

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Н.К.ДУШУТИН, А.Ю.МОХОВИКОВ

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Учебное пособие

Иркутск 2014

Печатается по решению редакционно-издательского совета ФГБОУ ВПО «ИГУ»

Рецензенты: *Л.А.Щербаченко*, доктор технических наук, профессор ИГУ
А.Е.Гафнер, кандидат педагогических наук, доцент ВСГАО

Душутин Н.К., Моховиков А.Ю.

Из истории Физики конденсированного состояния. Учеб.пособие / Н.К.Душутин ,
А.Ю.Моховиков – Иркутск: Изд-во Иркут.гос.ун-та, 2013. – с.

В пособии описываются исследования в области физики конденсированного состояния во второй половине XX века, удостоенные Нобелевских премий. Пособие написано на основе лекционного курса «История и методология науки»

Предназначено для студентов старших курсов физических специальностей университетов.

©Моховиков А.Ю, 2014

©Душутин Н.К., 2014

© ФГБОУ ВПО «ИГУ»

Ich mag diese Physik des festen Körpers nicht – *не нравится мне эта физика твердого тела* – сказал однажды выдающийся ученый Нобелевский лауреат Вольфганг Паули. Действительно, только в физике твердого тела встречается множество невероятно трудных задач, а также уникальный «лихой» стиль их решения. Поэтому как Паули, так и другие крупнейшие физики отдали много сил и времени решению этих задач, развивая тем самым и обогащая содержание данной области физики. (Паули, например, принадлежит исключительно изящная теория парамагнетизма электронного газа).

Важнейшими достижениями науки и техники XX века безусловно являются создание теории относительности, квантовой механики и овладение ядерной энергией. Однако квантовая теория твердого тела была заложена Эйнштейном и Дебаем до планетарной модели атома Резерфорда-Бора. А влияние на физику, технику и технологию открытия рентгеновского излучения, транзистора и лазера было столь же внушительным как открытие вынужденного деления и не имело отрицательных последствий.

За последние тридцать лет физика твердого тела по числу полученных Нобелевских премий опережает физику элементарных частиц и астрофизику вместе взятых. Даже, несмотря на то, что «исследование полупроводников и Нобелевская премия по физике кажутся несовместимыми, поскольку обычно считается, что такая сложная система, какой является полупроводниковый транзистор, мало пригодна для фундаментальных открытий», как сказал в своей Нобелевской лекции К. фон Клитцинг.

Наконец, среди Нобелевских лауреатов за исследования в области физики конденсированного состояния особенно много наших соотечественников: Черенков П.А., Тамм И.Е., Франк И.М. (1958 год) «За открытие и объяснение эффекта Черенкова-Вавилова»; Ландау Л.Д. (1962 год) «За пионерские исследования по теории конденсированных сред, особенно жидкого гелия»; Басов Н.Г., Прохоров А.М. (1964 год) «За фундаментальные исследования в области квантовой электроники, которые привели к созданию генераторов и усилителей нового типа – мазеров и лазеров»; 1978 Капица П.Л. (1978 год) «За открытия в области физики низких температур»; Алферов Ж.И. (2000 год) «За основополагающие работы в области информационных и коммуникативных технологий (исследования гетероструктур)»; Гинзбург В.Л., Абрикосов А.А. (2003 год) «За вклад в теорию сверхпроводимости».

Настоящее пособие не является учебником по физике твердого тела, равно как и по методологии физики. Целью его является дать представление о содержании и истории ряда экспериментальных и теоретических исследований в области физики твердого тела удостоенных впоследствии Нобелевских премий.

История науки и техники неотделима от развития науки и техники. Потребность проследить путь, приведший к необходимости пересмотреть сложившиеся представления, влияние выдающихся изобретений и открытий на технологии, заставляла обращаться к истории науки величайших ее

представителей – Галилея, Ньютона, Максвелла, Планка, Эйнштейна. Критический анализ работ предшественников является неотъемлемой частью процесса и осуществляется в той или иной мере каждым ученым. Однако уже в XVII веке стали появляться и собственно исторические труды, в которых на первых порах задача сводилась к последовательному описанию тех или иных событий, установлению преемственности в наблюдениях, опытах, их истолкований. Тогда же стали возникать споры о приоритете и расхождения в оценке событий между представителями разных стран. По мере того как прояснялась роль науки и физики, в частности, в жизни общества (производство, связь, быт, военные применения), усиливался интерес к ее истории у представителей общественных наук. В философии появилась тенденция обращаться к истории физики для обоснования тех или иных положений.

Содержание пособия охватывает немногим более половины работ в области физики твердого тела, удостоенных Нобелевских премий. Первая глава посвящена разработке транзистора и другим элементам полупроводниковой электроники, а также гетероструктурам и гетеропереходам. Гигантское магнетосопротивление, квантовый эффект Холла и связанные с ним вопросы обсуждаются во второй главе. В третьей главе рассматриваются ядерно-физические методы в физике твердого тела. Описание лазеров и их приложений в физике, технике и технологиях приведено в четвертой главе. В пятой главе описываются зондовые технологии, удержание отдельных атомов и ионов в ловушках, а также получение конденсата Бозе-Эйнштейна. Квантовые жидкости, явления сверхпроводимости и сверхтекучести рассмотрены в последней шестой главе.

Надеемся, что данное пособие окажется полезным преподавателям средних школ и вузов, аспирантам, студентам, школьникам старших классов и другим.

Глава 1. Транзистор. Полупроводниковая электроника.

ТРАНЗИСТОР, полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления электрического тока и управления им. Транзисторы выпускаются в виде дискретных компонентов в индивидуальных корпусах или в виде активных элементов, так называемых интегральных схем, где их размеры не превышают 0,025 мм. В связи с тем, что транзисторы очень легко приспособлять к различным условиям применения, они почти полностью заменили электронные лампы. На основе транзисторов и их применений выросла широкая отрасль промышленности – полупроводниковая электроника. Одно из первых промышленных применений транзистор нашел на телефонных коммутационных станциях. Первым же товаром широкого потребления на транзисторах были слуховые аппараты, появившиеся в продаже в 1952 году. Сегодня транзисторы и многотранзисторные интегральные схемы используются в телерадиоаппаратуре, аудиосистемах, детских игрушках, планшетных компьютерах, системах пожарной и охранной сигнализации, игровых телеприставках и регуляторах всех видов – от регуляторов света до регуляторов мощности на локомотивах и в тяжелой промышленности. В настоящее время «транзисторизованы» системы впрыска топлива и зажигания, системы регулирования и управления, фотоаппараты и цифровые часы. Наибольшие изменения транзистор произвел, пожалуй, в системах обработки данных и системах связи – от телефонных подстанций до мейнфреймов (больших ЭВМ) и центральных АТС. Космические полеты были бы практически невозможны без транзисторов. В области обороны и военного дела без транзисторов не могут обходиться компьютеры, системы передачи цифровых данных, системы управления и наведения, взрыватели, радиолокационные системы, системы связи и разнообразное другое оборудование. В современных системах наземного и воздушного наблюдения, в ракетных войсках – всюду применяются полупроводниковые компоненты. Перечень видов применения транзисторов огромен и продолжает увеличиваться

В 1954 году было произведено немногим более 1 млн. транзисторов. Сейчас эту цифру невозможно даже указать. Первоначально транзисторы стоили очень дорого. Сегодня транзисторные устройства для обработки сигнала можно купить за несколько центов.

Объем исследований по физике твердого тела нарастал с 1930-х годов, а в 1948 году было сообщено об изобретении транзистора. За созданием транзистора последовал необычайный расцвет науки и техники. Был дан толчок исследованиям в области выращивания кристаллов, диффузии в твердом теле, физики поверхности и во многих других областях. Были разработаны разные типы транзисторов, среди которых можно назвать точечный германиевый и кремниевый с выращенными переходами, полевой транзистор (ПТ) и транзистор со структурой металл – оксид –

полупроводник (МОП-транзистор). Были созданы также устройства на основе интерметаллических соединений элементов третьего и пятого столбцов периодической системы Менделеева; примером, которых может служить арсенид галлия. Наиболее распространены планарные кремниевые, полевые и кремниевые МОП-транзисторы. Широко применяются также такие разновидности транзистора, как триодные тиристоры и симисторы, которые играют важную роль в технике коммутации и регулировании сильных токов. Транзистор был разработан в Лаборатории Белл Телефон Дж. Бардиным, У.Браттейном и У.Шоккли

*Американский физик и инженер-электрик **Джон Бардин** (23.05.1908 - 30.01.1998) родился в г. Мэдисон (штат Висконсин) в семье Чарлза Р. Бардина, профессора анатомии и декана медицинской школы при Висконсинском университете, и Элси (в девичестве Хармер) Бардин. После смерти матери мальчика в 1920 году его отец женился на Рут Хеймс. У Бардина есть два брата, сестра и сводная сестра.*

Бардин посещал начальную школу в Мэдисоне, перескочив через четвертый, пятый и шестой классы, затем поступил в университетскую среднюю школу, перешел из нее в мэдисонскую центральную среднюю школу, которую и окончил в 1923 году. Несмотря на врожденный порок – тремор руки, он в молодости был чемпионом по плаванию и умелым игроком в бильярд.

В Висконсинском университете Бардин получил степень бакалавра по электротехнике в 1928 году, изучив в качестве непрофилирующих дисциплин физику и математику. Еще студентом старших курсов он работал в инженерном отделе «Вестерн электрик компани» (этот отдел позднее вошел в систему лабораторий компании «Белл»). В 1929 году он получил степень магистра по электротехнике в Висконсинском университете, проведя исследование по прикладной геофизике и излучению антенн. В следующем году он последовал за одним из своих руководителей, американским геофизиком Лео Дж. Питерсом, в Питсбург (штат Пенсильвания), где в компании «Галф ризерч» они разработали новую методику, позволявшую, анализируя карты гравитационной и магнитной напряженностей, определять вероятное расположение нефтяных месторождений.

В 1933 году Бардин поступил в Принстонский университет, где изучал математику и физику под руководством Эугена П. Вигнера. (впоследствии Нобелевского лауреата) Он сосредоточил свое внимание на применении квантовой теории к физике твердого тела. К тому времени квантовая механика довольно успешно описывала поведение индивидуальных атомов и частиц внутри атома. Твердые тела подчиняются тем же самым квантовомеханическим законам, но, поскольку макроскопическое тело состоит из большого числа атомов, задача анализа его свойств

значительно сложнее. Докторскую степень Бардин получил в Принстоне в 1936 году за диссертацию, посвященную силам притяжения, удерживающим электроны внутри металла. За год до окончания своей диссертации он принял предложение стать на год после защиты временным научным сотрудником Гарвардского университета, каковым и оставался до 1938 года. В Гарварде Бардин работал с Джоном Г. Ван Флеком и П.У. Бриджменом (будущими Нобелевскими лауреатами) над проблемами атомной связи и электрической проводимости в металлах.

Когда оговоренный срок закончился, Бардин стал ассистент-профессором в Миннесотском университете, где он продолжил свои исследования поведения электронов в металлах. Между 1941 и 1945 годами он служил гражданским физиком военно-морской артиллерийской лаборатории в Вашингтоне (округ Колумбия), изучая магнитные поля кораблей – важный по тем временам вопрос, учитывая его приложения к торпедному делу и тралению мин.

В 1945 году Бардин перешел в компанию «Белл Телефон», где, работая совместно с Уильямом Шоккли и Уолтером Браттейном, ему удалось создать полупроводниковые приборы, которые могли, как выпрямлять, так и усиливать электрические сигналы. В процессе этой работы Шоккли пытался построить то, что теперь называется полевым транзистором. В таком приборе электрическое поле, индуцированное напряжением, приложенным к полупроводнику, должно было влиять на движение электронов внутри материала. Шоккли надеялся использовать электрическое поле, чтобы управлять свободными электронами в одном из участков полупроводника и тем самым модулировать ток, текущий через прибор. Кроме того, транзистор должен был обладать потенциальной возможностью стать усилителем, поскольку небольшой сигнал (приложенное напряжение) мог вызвать большие изменения тока, текущего через полупроводник.

Все попытки построить прибор, следуя этому плану, закончились неудачей. Тогда Бардин выдвинул предположение, что внешнее напряжение не создает внутри полупроводника желаемого поля из-за слоя электронов, находящихся на его поверхности. В процессе дальнейших исследований выяснилось, что свойства прибора зависят от освещенности, температуры, поверхности и изменяются при контакте с жидкостями или напылении на полупроводник металлической пленки. В 1947 году, как только группа по-настоящему разобралась в поверхностных свойствах полупроводников, Бардин и Браттейн построили первые работающие транзисторы.

Одним из первых был создан точечно-контактный транзистор, сделанный из одного куска германия. Точечными контактами были два тонких «усика» из металла, названных эмиттером и коллектором и прикрепленных

к верхней части германиевого блока; третий контакт, названный базой, был связан с нижней частью блока. Для управления током между эмиттером и коллектором использовался небольшой ток, текущий между эмиттером и базой. Эта идея заменила собой первоначальную идею управления с помощью внешнего электрического поля. В более позднем варианте, названном плоскостным триодом, точечные контакты были удалены, а эмиттер и коллектор были образованы из полупроводниковых материалов, в которые вкраплены небольшие количества специальных примесей. Полевые транзисторы не находили практического применения, пока германий не был заменен кремнием в качестве основного материала.

Подобно радиолампе, транзистор позволяет с помощью небольшого сигнала (напряжение для лампы, ток для транзистора) в одном контуре управлять относительно большим током в другом контуре. Благодаря небольшим размерам, простоте структуры, низким энергетическим потребностям и малой стоимости транзисторы быстро вытеснили электронные лампы во всех радиотехнических приборах, за исключением устройств высокой мощности, используемых, например, в радиовещании или промышленных радиочастотных нагревательных установках. В настоящее время во всех высокоскоростных радиотехнических устройствах, а также во многих мощных высокочастотных установках, где можно обойтись без электронных ламп, обычно используются биполярные транзисторы. Усовершенствование технологии сделало возможным создание многих транзисторов из крохотных кусочков кремния, способных выполнять более сложные функции. Число транзисторов в одном подобном кусочке возросло с десяти до миллиона, в частности, благодаря уменьшению размеров соединений и самих транзисторов до величины от половины микрона до нескольких микрон. Такие кусочки позволяют строить современные компьютеры, средства связи и управления, причем технология продолжает быстро развиваться.

В 1956 году Бардин разделил Нобелевскую премию с Шоккли и Браттейном «за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта». «Транзистор во многом превосходит радиолампы», – отметил Е.Г. Рудберг, член Шведской королевской академии наук, при презентации лауреатов. Указав, что транзисторы значительно меньше электронных ламп и в отличие от последних не нуждаются в электрическом токе для накала нити, Рудберг добавил, что «для акустических приборов, вычислительных машин, телефонных станций и многого другого требуется именно такое устройство».

В 1951 году Бардин покинул компанию «Белл» и принял предложение занять одновременно два поста: профессора электротехники и профессора физики в Иллинойском университете. Здесь у него возобновился серьезный интерес к теме, которой он занимался в аспирантские годы и которая была прервана второй мировой войной и не возобновлялась им до 1950 года,

– проблеме сверхпроводимости и свойств материи при сверхнизких температурах.

Сверхпроводимость была открыта в 1911 году голландским физиком Хейке Камерлинг-Оннесом, который обнаружил, что некоторые металлы совершенно теряют сопротивление к электрическому току при температурах, на несколько градусов превышающих абсолютный нуль.

В металлах многие электроны настолько слабо связаны со своими атомами, что электрическое поле, возникающее благодаря приложенному внешнему напряжению, заставляет их перемещаться в направлении поля. Однако электроны также совершают колебания в случайных направлениях из-за наличия тепла. Это рассеянное движение служит причиной противодействия (сопротивления) потоку электронов под влиянием поля. Когда в результате охлаждения тепловое движение уменьшается, то сопротивление тоже уменьшается. При абсолютном нуле, когда тепловое движение совсем прекращается, можно ожидать, что сопротивление совсем исчезнет. Однако абсолютный нуль практически недостижим. Удивительно в сверхпроводимости то, что сопротивление исчезает при температуре, несколько превышающей абсолютный нуль, когда еще имеется тепловое движение. Никакого удовлетворительного объяснения этому найти, тогда не удалось.

Оказалось, что сверхпроводники обладают еще одной необычной особенностью, открытой в 1933 году немецким физиком Вальтером Мейснером. Он обнаружил, что сверхпроводники являются также идеальными диамагнетиками, то есть препятствуют проникновению внутрь металла магнитного поля. Парамагнитные материалы, среди которых находятся обычные магнитные металлы, более или менее поддаются намагничиванию со стороны близко расположенного магнита. Поскольку магнитное поле магнита индуцирует поле противоположной направленности в парамагнитном теле, это тело притягивается к магниту. Но так как диамагнитное тело противодействует магнитному полю, это тело и магнит взаимно отталкиваются, независимо от того, какой именно полюс магнита мы подносим к нему. Магнит, помещенный над сверхпроводником, будет покоиться «на подушке магнитного отталкивания». Однако, если внешнее магнитное поле достаточно велико, то оно врывается внутрь сверхпроводника, сверхпроводник теряет свои свойства и ведет себя подобно обычному металлу. В 1935 году немецкие физики братья Фриц и Гейнц Лондоны выдвинули предположение, что диамагнетизм является фундаментальным свойством сверхпроводников и что сверхпроводимость, возможно, представляет собой некий квантовый эффект, проявляющийся каким-то образом во всем теле.

Признаки того, что Лондоны были на верном пути, появились в 1950 году. Несколько американских физиков обнаружили, что различные изотопы

одного и того же металла становятся сверхпроводящими при различных температурах и что критическая температура обратно пропорциональна атомной массе. Изотопы представляют собой формы элемента, имеющие одинаковое число протонов в своих ядрах (и, следовательно, одинаковое число окружающих ядро электронов) и химически подобны друг другу, но их ядра содержат различное число нейтронов и, следовательно, обладают различными массами. Бардин знал, что единственное влияние различных атомных масс на свойства твердого тела проявляется в различиях при распространении колебаний внутри тела. Поэтому он предположил, что в сверхпроводимости металла участвует взаимодействие между подвижными электронами (которые относительно свободны, так что могут двигаться, образуя электрический ток) и колебаниями атомов металла и что в результате этого взаимодействия создается связь электронов друг с другом.

К исследованиям Бардина позднее присоединились два его студента по Иллинойскому университету – Леон Н. Купер, который вел исследовательскую работу после защиты докторской диссертации, и Дж. Роберт Шриффер, аспирант. В 1956 году Купер показал, что электрон (который несет отрицательный заряд), движущийся сквозь регулярную структуру (решетку) металлического кристалла, притягивает ближайшие положительно заряженные атомы, слегка деформируя решетку и создавая кратковременное увеличение концентрации положительного заряда. Эта концентрация положительного заряда в свою очередь притягивает второй электрон, и два электрона образуют пару, связанную друг с другом благодаря искажению кристаллической решетки. Таким путем многие электроны в металле объединяются по два, образуя куперовские пары.

Бардин и Шриффер попытались с помощью концепции Купера объяснить поведение обширной популяции свободных электронов в сверхпроводящем металле, но их постигла неудача. Когда Бардин в 1956 году отправился в Стокгольм получать Нобелевскую премию, Шриффер уже готов был признать поражение, но напутствие Бардина запало ему в душу, и ему удалось-таки развить статистические методы, необходимые для решения данной проблемы.

После этого Бардину, Куперу и Шрифферу удалось показать, что куперовские пары, взаимодействуя между собой, заставляют многие свободные электроны в сверхпроводнике двигаться в унисон, единым потоком. Как и догадывался Ф. Лондон, сверхпроводящие электроны образуют единое квантовое состояние, охватывающее все металлическое тело. Критическая температура, при которой возникает сверхпроводимость, определяет ту степень уменьшения температурных колебаний, когда влияние куперовских пар на корреляцию движения свободных электронов становится доминирующим. Поскольку

возникновение сопротивления при отклонении даже одного электрона от общего потока с необходимостью повлияет на другие электроны, участвующие в сверхпроводимости, и тем самым нарушит единство квантового состояния, такое возмущение весьма маловероятно. Поэтому сверхпроводящие электроны перемещаются коллективно, без потери энергии.

Достижение Бардина, Купера и Шриффера было названо одним из наиболее важных в теоретической физике с момента создания квантовой теории. В 1958 года они с помощью своей теории предсказали сверхтекучесть у жидкого гелия-3 вблизи абсолютного нуля, что и подтвердилось экспериментально. Сверхтекучесть наблюдалась ранее у гелия-4 (наиболее распространенный изотоп), и считалось, что она невозможна у изотопов с нечетным числом нуклонов.

Бардин, Купер и Шриффер разделили в 1972 году Нобелевскую премию по физике «за совместное создание теории сверхпроводимости, обычно называемой БКШ-теорией». Стиг Лундквист, член Шведской королевской академии наук, при презентации лауреатов отметил полноту объяснения ими сверхпроводимости и добавил: «Ваша теория предсказала новые эффекты и весьма стимулировала дальнейшие разработки в теоретических и экспериментальных исследованиях». Он также указал на то, что «дальнейшее развитие... подтвердило огромное значение и ценность идей, заложенных в этой фундаментальной работе 1957 года»

БКШ-теория привела к далеко идущим последствиям в технологии и теории. Создание материалов, которые становились сверхпроводниками при более высоких температурах или выдерживали сильные магнитные поля, позволило сконструировать исключительно мощные электромагниты небольших размеров, потребляющие мало энергии. Магнитное поле, создаваемое электромагнитом, прямо связано с током в его обмотках. Для обычного проводника наличие сопротивления служит серьезным ограничением, поскольку выделяемое тепло пропорционально сопротивлению и квадрату силы тока. Дело не только в том, что на тепловые потери расходуется дорогостоящая энергия, но при этом также изнашивается материал. Сверхпроводящие магниты используются при исследованиях управляемого термоядерного синтеза, в магнитной гидродинамике, в ускорителях частиц высокой энергии, в поездах, движущихся без трения на магнитной подушке над рельсами, в биологических и физических исследованиях взаимодействия атомов и электронов с сильными магнитными полями и при конструировании компактных мощных электрических генераторов. Датчики, основанные на эффектах Джозефсона, способны определять малейшие изменения магнитной активности в живых организмах и помогают обнаруживать месторождения полезных ископаемых и нефти по их магнитным свойствам.

В 1959 году Бардин начал работать в Центре фундаментальных исследований Иллинойского университета, продолжая свои изыскания в области физики твердого тела и физики низких температур. В 1975 году он стал почетным профессором в отставке.

Бардин в 1938 году женился на Джейн Максвелл; у них два сына и дочь. В свободное время он путешествует и играет в гольф.

Среди многочисленных наград Бардина – медаль Стюарта Баллантайна Франклиновского института (1952), премия Джона Скотта (1955), премия по физике твердого тела Оливера Бакли Американского физического общества (1954), Национальная медаль «За научные достижения» Национального научного фонда (1965), почетная медаль Института инженеров по электротехнике и электронике (1971); президентская медаль Свободы правительства Соединенных Штатов (1977). В течение многих лет Бардин был соиздателем журнала «Physical Review». Он член американской Национальной академии наук и Американской академии наук и искусств, а также был избран членом Американского физического общества.

*Американский физик **Уолтер Хаузер Браттейн** (10.02.1902 – 13.10.1987) родился в г. Амой (Сямынь) на юго-востоке Китая. Сын Росса Р. Браттейна, учителя частной школы для китайских детей, и Оттилии (Хаузер) Браттейн, он был старшим из пятерых детей. В раннем детстве Браттейна семья вернулась в штат Вашингтон, где выросли старшие Браттейны, и обосновалась в Тонаскете. Его отец приобрел участок земли, стал владельцем скотоводческого ранчо и мельницы. Мальчик посещал школу в Тонаскете, затем поступил в Уайтмен-колледж в Балла Валла, выбрав в качестве профилирующих предметов математику и физику. Он стал бакалавром в 1924 году, получил степень магистра по физике в Орегонском университете в 1926 году и защитил докторскую диссертацию по физике в Миннесотском университете в 1929 году. Хотя Браттейну нравилась жизнь на ранчо, на лоне природы, фермерский труд он ненавидел. «Хождение в пыли за тремя лошадьми и бороной вот что сделало из меня физика», – скажет он впоследствии.*

В рамках своей докторской программы Браттейн провел 1928/29 академический год в Национальном бюро стандартов США, где работал над увеличением точности измерений времени и частоты колебаний, а также помогал разрабатывать портативный генератор с температурной регулировкой. В 1929 году он поступил в лаборатории «Белл телефон» в качестве физика-исследователя и работал здесь до выхода в отставку в 1967 году, после чего вернулся в Уайтмен-колледж, чтобы преподавать физику и заниматься изучением живых клеток.

Первые 7 лет в лабораториях «Белл» Браттейн изучал такие явления, как

влияние адсорбционных пленок на эмиссию электронов горячими поверхностями, электронные столкновения в парах ртути, занимался магнитометрами, инфракрасными явлениями и эталонами частоты В то время главным электронным усилительным устройством была трехэлектродная вакуумная лампа (триод), изобретенная Ли де Форестом в 1907 году. Еще в конце XIX века Томас Эдисон, занимаясь проблемами электрического освещения, обнаружил, что между раскаленной нитью и вторым электродом, если их поместить в герметическую колбу, откачать воздух и подсоединить батарею, возникает электрический ток. Так родилась двухэлектродная лампа (диод) Позднее физики показали, что нить испускает электроны, которые несут отрицательный заряд и притягиваются положительным электродом. Поскольку диоды проводят ток только в одном направлении, они стали использоваться как выпрямители, превращающие переменный, меняющий направление ток в постоянный ток, текущий только в одном направлении. Де Форест вставил проволочную сетку (решетку) между излучателем электронов (катодом) и положительным электродом (анодом) Небольшое изменение напряжения на сетке ведет к большим изменениям тока, текущего сквозь сетку между катодом и анодом, тем самым позволяя усиливать сигнал, приложенный к сетке. Высокая температура, необходимая для эмиссии электронов, сокращает срок жизни катода и портит электронную лампу. Братттейн обнаружил, что некоторые тонкие катодные покрытия BaO SrO , BaO SrO CuO (так называемые оксидные катоды) обеспечивают удовлетворительную эмиссию при меньших температурах, усиливая эффект и продлевая срок жизни лампы.

Когда в 1936 году в лабораторию «Белл» пришел Уильям Шокли, он быстро включился в исследования свойств полупроводников Его целью было заменить вакуумные электронные лампы приборами из твердых материалов, которые были бы меньше размером, менее хрупкими и энергетически более эффективными Электропроводность полупроводников занимает промежуточное положение между электропроводностью проводников (главным образом металлов) и изоляторов и сильно меняется при наличии даже небольших количеств примесей. В первых радиоприемниках использовался контакт между витком тонкой проволоки (усиком) и куском минерала галенита (полупроводником) для детектирования принятых антенной радиоволн. Исследуя полупроводники, Братттейн и Шоккли искали материал, который мог бы как детектировать, так и усиливать сигналы Их исследования были прерваны войной. С 1942 по 1945 год они перешли в отдел военных исследований при Колумбийском университете, где занимались применением научных разработок в противолодочной обороне. Шокли отошел от данных исследований несколько раньше Братттейна, и стал работать над радаром.

Когда после войны Братттейн и Шоккли вернулись в лаборатории «Белл», к ним присоединился физик-теоретик Джон Бардин. В этом содружестве Братттейн выполнял роль экспериментатора, который определял свойства и поведение исследуемых материалов и приборов. Шоккли выдвинул теоретическое предположение, что воздействуя на ток электрическим полем от приложенного напряжения, можно получить усилитель с полевым воздействием. Это поле должно действовать аналогично тому, которое возникает на сетке триодного усилителя. Группа создала много приборов, чтобы проверить теорию Шоккли, но все без практических результатов.

Тут Бардину пришла в голову мысль, что поле не может проникнуть внутрь полупроводника из-за слоя электронов, расположенных на его поверхности. Это вызвало интенсивные исследования поверхностных эффектов. Поверхности полупроводников были подвергнуты воздействию света, тепла, холода, они смачивались жидкостями (изолирующими и проводящими) и покрывались металлическими пленками. В 1947 году, когда группа глубоко разобралась в поведении и свойствах поверхности полупроводников, Братттейн и Бардин сконструировали прибор, в котором впервые проявилось то, что позднее стало известно как транзисторный эффект. Этот прибор, названный точечно-контактным транзистором, состоял из кристалла германия, содержащего небольшую концентрацию примесей. С одной стороны кристалла располагались два контакта из золотой фольги, с другой стороны был третий контакт. Положительное напряжение прикладывалось между первым золотым контактом (эмиттером) и третьим контактом (базой), а отрицательное напряжение – между вторым золотым контактом (коллектором) и базой. Сигнал, поступающий на эмиттер, оказывал влияние на ток в контуре коллектор – база. Хотя этот прибор усиливал сигнал, как и было задумано, но принцип его работы не находил удовлетворительного объяснения, что вызвало новый тур исследований.

Хотя теория полупроводников во многом уже была разработана с помощью квантовой механики, предсказания этой теории еще не нашли адекватного количественного подтверждения в эксперименте. Атомы в кристаллах держатся вместе с помощью электронов, наиболее слабо связанных со своими ядрами. В совершенном кристалле связи, как принято говорить, «насыщены» или «заполнены». Электроны трудно оторвать, они с трудом перемещаются, что приводит к очень высокому электрическому сопротивлению. Такой кристалл представляет собой изолятор. Однако вкрапления чужеродных атомов, которые не вполне подходят к данной структуре, приводят либо к появлению избыточных электронов, способных участвовать в электрическом токе, либо к дефициту электронов, известному как «дырки». Во внешнем поле дырки движутся, как если бы они были положительно заряженными электронами, хотя и с

другой скоростью. Фактически дырки представляют собой места, покинутые электронами, и, следовательно, все выглядит так, как если бы дырки двигались в обратном направлении, в то время как электроны двигаются в прямом направлении, заполняя ранее пустые места и образуя новые дырки там, откуда они ушли. Оказалось, что для объяснения действия транзистора нужно учитывать комплексное взаимодействие примесей разных видов и концентраций, локальный характер контактов между различными материалами и вклад, который дают в ток как электроны, так и дырки. Важная роль дырок не была в должной мере предугадана заранее.

Шоккли предсказал, что прибор можно улучшить, заменив металлополупроводниковые контакты более качественными контактами между различными типами полупроводников, в одном из которых доминируют избыточные электроны (n-тип), а в другом дырки (p-тип). Удачная модель, названная плоскостным транзистором, была сделана в 1950 году. Она состояла из тонкого слоя p-типа, расположенного – наподобие сэндвича – между двумя слоями n-типа с металлическими контактами в каждом слое. Этот прибор работал именно так, как и предсказывал Шоккли. Плоскостные транзисторы стали широко использоваться вместо точечно-контактных типов, поскольку их было легче изготавливать и они лучше работали. Раннюю идею Шоккли, транзистор с полевым воздействием, долго не удавалось осуществить, поскольку среди доступных материалов не было подходящих. Работающий полевой транзистор был построен на основе кристаллов кремния, когда методы выращивания и очистки кристаллов достаточно далеко продвинулись вперед.

Подобно электронной лампе, транзисторы позволяют небольшому току, текущему в одном контуре, контролировать гораздо больший ток, текущий в другом контуре. Транзисторы быстро вытеснили радиолампы всюду, за исключением тех случаев, где требуется управлять очень большой мощностью, как, например, в радиовещании или в промышленных нагревательных радиочастотных установках. Биполярные транзисторы обычно используются там, где требуется высокая скорость, так же как и в высокочастотных установках, где нет настоящей необходимости применять электронные лампы. Полевые транзисторы – это основной тип транзисторов, используемых в электронных приборах. Его легче изготавливать, а энергии он потребляет даже меньше биполярного транзистора. Хотя часть транзисторов еще делают из германия, большая часть их изготавливается из кремния, который более устойчив к воздействию высоких температур. С дальнейшим развитием технологии стало возможным располагать в одном кусочке кремния до миллиона транзисторов, и это число продолжает возрастать. Подобные кремниевые блоки служат основой для быстрого развития современных

компьютеров, средств связи и управления.

Нобелевскую премию по физике за 1956 год Браттейн разделил с Бардином и Шокли. Они были награждены «за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта». В своей Нобелевской лекции «Поверхностные свойства полупроводников» ("Surface Properties of Semiconductors") Браттейн подчеркнул важность поверхностей, «где происходит много, если не большинство, интересных и полезных явлений. В электронике с большинством, если не со всеми, элементов контура связаны неравновесные явления, происходящие на поверхностях».

Дальнейшие исследования Браттейна, посвященные свойствам полупроводников и их поверхностей, были чрезвычайно важны для полевых транзисторов, которые очень чувствительны к поверхностным дефектам, и для солнечных батарей, свойства которых определяются электрическими свойствами поверхности.

В 1935 году Браттейн женился на Керен Джилмор, занимавшейся физической химией; у них был сын. В 1957 году она умерла, а через год Браттейн женился на Эмме Джейн Кири Миллер. Браттейн известен как человек прямой и искренний. Среди его увлечений – гольф, рыбная ловля и чтение книг.

Среди других наград Браттейна можно назвать медаль Стюарта Баллантайна Франклиновского института (1952), премию Джона Скотта г. Филадельфии (1955) и почетную награду выпускникам Орегонского университета (1976). Он обладает пятью почетными докторскими степенями, состоит членом Национальной академии наук и Почетного общества изобретателей, а также является членом Американской академии наук и искусств, Американской ассоциации содействия развитию науки и Американского физического общества.

Американский физик **Уильям Брэдфорд Шокли** (13.02.1910 – 12.08.1989) родился в Лондоне, в семье Уильяма Хиллмена Шокли, горного инженера, и Мэй (урожденной Брэдфорд) Шокли – федерального инспектора шахт. Когда мальчику исполнилось три года, семья возвратилась в Соединенные Штаты и поселилась в Пало-Альто (штат Калифорния), где Шокли получил начальное образование. Родители поощряли его интерес к физике, пробудившийся под влиянием соседа, преподававшего физику в Станфордском университете.

Окончив в 1927 году среднюю школу в Голливуде, Шокли поступает в Калифорнийский университет в Лос-Анджелесе и через год переходит в Калифорнийский технологический институт, который заканчивает в 1932 году со степенью бакалавра. На учительскую стипендию он

обучается в аспирантуре Массачусетского технологического института (МТИ) и в 1936 году защищает докторскую диссертацию на тему «Вычисление волновых функций для электронов в кристаллах хлорида натрия» ("Calculations of Wave Functions for Electrons in Sodium Chloride Crystals"). Физику твердого тела Шокли изучает в МТИ, и его работа по кристаллам становится прочным фундаментом для последующей научной деятельности.

В 1936 году он становится сотрудником лаборатории компании «Белл» в Мюррей-Хилле (штат Нью-Джерси), где работает с Клинтоном Дж. Дэвиссоном (Нобелевским лауреатом 1937 года). Первым заданием Шокли было проектирование электронного умножителя – особого рода электронной лампы, действующей как усилитель. Затем он занимается исследованиями по физике твердого тела и в 1939 году выдвигает план разработки твердотельных усилителей как альтернативы вакуумным электронным лампам. Его проект оказался неосуществимым из-за отсутствия в то время необходимых материалов, но основной замысел совпадал с общей направленностью всей деятельности лаборатории «Белл» – с развитием телефонной связи на основе не механических переключателей, а электронных устройств.

Во время второй мировой войны Шокли работает над военными проектами, сначала над электронным оборудованием полевой радарной станции фирмы «Белл». С 1942 по 1944 год он исполняет обязанности директора по науке группы по исследованию противолодочных операций, учрежденной Управлением военно-морского флота при Колумбийском университете в Нью-Йорке, в 1944-45 годах состоит консультантом при канцелярии военного министра. Новая область, получившая название «исследование операций», ставила перед собой чисто военные задачи, которые анализировала и решала научными методами, например разработку оптимальных схем сбрасывания глубинных бомб при охоте за подводными лодками или выбор оптимального времени и целей для бомбардировочной авиации.

В 1945 году Шокли возвращается в лабораторию «Белл» в качестве директора программы научных исследований по физике твердого тела. В его группу входят теоретик Джон Бардин и экспериментатор Уолтер Браттейн. Группа возобновляет начатые перед войной исследования полупроводников. Полупроводники обладают электропроводностью, промежуточной между электропроводностью хороших проводников (к числу которых относится большинство металлов) и изоляторов. Электропроводность полупроводников сильно изменяется в зависимости от температуры, а также характера и концентрации примесей в материале. Полупроводники уже использовались в качестве выпрямителей – устройств, проводящих электрический ток только в одном направлении и способных поэтому превращать переменный ток в постоянный. В первых

радиоприемниках в качестве детектора радиоволн, принимаемых антенной, использовался контакт между «кошачьим усом» (витком проволоочки) и кристаллами галенита (полупроводникового минерала).

Со временем кристаллы были заменены электронными лампами, которые стали наиболее важными и распространенными электронными устройствами. Появление усилительных ламп открыло путь для роста электронной промышленности, но срок службы ламп был сравнительно коротким, для подогрева катодов требовался дополнительный расход энергии, хрупкие стеклянные баллоны занимали большой объем. Шоккли и его группа надеялись преодолеть эти недостатки, изготавливая усилители из выпрямляющих ток полупроводников.

Хотя применение квантовой теории к физике твердого тела расширило знание свойств полупроводников, теория не была адекватно подтверждена экспериментами. Шоккли намеревался моделировать основной принцип устройства электронной лампы, прикладывая электрическое поле поперек полупроводника с тем, чтобы управлять прохождением электрического тока. Хотя вычисления Шоккли показывали, что такое поле должно приводить к усилению тока, получить практические результаты не удавалось. Бардин высказал предположение о том, что электроны оказываются запертыми в поверхностном слое, который препятствует проникновению поля внутрь полупроводника. За этой удачной идеей последовала серия экспериментов по изучению поверхностных эффектов. Эти эксперименты помогли трем исследователям понять сложное поведение полупроводниковых устройств.

Было известно, что проводимость в полупроводниках осуществляется носителями заряда двух типов: электронами и «дырками». Электроны, участвующие в проводимости, – это избыточные электроны из числа тех, которые связывают атомы и твердый кристалл. Дырки соответствуют недостающим электронам. Так как электрон несет отрицательный заряд, незаполненное электронное состояние ведет себя как положительный заряд такой же величины. Дырки также обладают способностью двигаться, хотя и не с такой скоростью, как электроны, и в противоположном направлении. Когда соседний электрон перемещается «вперед», чтобы заполнить дырку, он оставляет позади себя новую дырку, поэтому создается впечатление, будто дырка движется назад. Группа Шоккли установила, что вклад дырочного тока в полный ток обычно недооценивается. Вводимые в чистый кристалл примеси в виде атомов, нарушающих регулярную кристаллическую структуру, создают области с избыточным количеством электронов (n-тип) или дырок (p-тип).

В 1947 году Бардин и Браттейн достигли первого успеха, построив полупроводниковый усилитель, или транзистор (от английских слов transfer plus resistor, от лат. resisto – сопротивляюсь). Окончательный вариант

прибора состоял из блока германия (полупроводника *n*-типа) с двумя близко расположенными точечными контактами («кошачьими усами») на одной грани на противоположной грани. К одному контакту (эмиттеру) приложено небольшое положительное напряжение относительно широкого электрода (базы) и большое отрицательное напряжение относительно второго контакта (коллектора). Сигнальное напряжение, подаваемое на эмиттер вместе с постоянным смещением, передается со значительным усилением в цепь коллектора. В основе действия транзистора лежит внедрение дырок в германий через контакт-эмиттер и их движения к контакт-коллектору, где дырки усиливают коллекторный ток. Последующие события разворачивались стремительно, Шоккли предложил заменить точечные контакты выпрямляющими переходами между областями *p*- и *n*-типа в том же кристалле. Такое устройство, получившее название плоскостного транзистора, было изготовлено в 1950 году. Оно состояло из тонкой *p*-области, заключенной между двумя *n*-областями (все области имеют отдельные внешние контакты). Плоскостной транзистор основательно потеснил транзистор с точечными контактами, так как производить плоскостной транзистор оказалось гораздо легче, а функционирует он надежнее. Усовершенствование методов выращивания, очистки и обработки кристаллов кремния позволило осуществить давнюю идею Шоккли о создании транзистора на основе полевых эффектов. Ныне этот тип транзисторов наиболее широко используется в электронных устройствах. Современная промышленность в состоянии выпускать миниатюрные кремниевые кристаллы, в каждом из которых умещаются сотни тысяч транзисторов, и число это продолжает расти. Появление таких кристаллов стимулировало быстрое развитие новейших компьютеров, портативных, умещающихся в руке калькуляторов, сложных средств связи, приборов управления, слуховых аппаратов, медицинских зондов и других электронных устройств.

В 1956 году Шоккли, Бардин и Браттейн были удостоены Нобелевской премии по физике «за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта». На церемонии презентации Э.Г. Рудберг, член Шведской королевской академии наук, назвал их достижение «образцом предвидения, остроумия и настойчивости в достижении цели».

Шоккли оставался сотрудником лаборатории «Белл» до 1955 года, в последний год был руководителем исследований по физике транзисторов. Он также занимал различные должности вне лаборатории – был приглашенным лектором в Принстонском университете (1946), советником по науке Политического комитета Объединенной комиссии по исследованиям и развитию (1947-1949) и членом научно-консультативного комитета армии США (1951-1963). В 1954-55 годах Шоккли был приглашенным профессором Калифорнийского технологического

института и руководителем научных исследований группы оценки систем оружия министерства обороны США С 1958 по 1962 год он состоял также членом научно-консультативного комитета военно-воздушных сил США.

После ухода из лаборатории «Белл» Шоккли создает полупроводниковую лабораторию Шоккли (впоследствии транзисторную корпорацию Шоккли, входящую в состав компании «Бекман инструментс») в Пало-Альто, занимающуюся разработкой транзисторов и других полупроводниковых устройств. В 1968 году фирма после двукратной смены хозяев прекратила свое существование.

В 1962 году Шоккли был назначен членом консультативного научного комитета по рабочей силе при президенте США. Он входил также в научно-консультативный комитет при НАСА (Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства). В 1963 году Шоккли был назначен первым профессором инженерных и прикладных наук Станфордского университета, где он преподавал до выхода в отставку (1975).

Преподавание в Станфорде стимулировало у Шоккли интерес к проблеме совершенствования научного мышления. Его идеи относительно улучшения общества, в конце концов, вызвали споры среди ученых-генетиков. У Шоккли сложилось убеждение, что человечеству угрожает своего рода «ухудшение породы», поскольку у людей с более низким коэффициентом умственного развития рождается больше детей, чем у людей с более высоким коэффициентом. Его высказывания, носившие сначала общий характер, вскоре стали все более приобретать расистский оттенок. Так, в 1970 году, выступая в американской Национальной академии наук, он заявил, что проведенные им исследования «неизбежно приводят к выводу о расово-генетической основе проблем негритянского населения Америки». За подобные взгляды он был подвергнут резкой критике со стороны многих общественных деятелей и ученых, подчеркивавших, однако, что научная значимость достижений Шоккли никак не может быть подорвана его суждениями о генетике.

Кроме работ по физике полупроводников и транзисторов, Шоккли внес важный вклад в использование свойств магнитных материалов для банков памяти компьютеров и в развитие электромагнитной теории. В круг его интересов входили энергетические полосы в твердых телах, пластические свойства металлов, теория границ зерен (поверхностей, разделяющих крохотные кристаллики, образующие поликристаллическое тело), порядок и беспорядок в сплавах. Шоккли получил более 90 патентов на изобретения.

В 1933 году он женился на Джин Альберте Бейли. У них родились двое

сыновей и дочь. В 1955 году они развелись, и в том же году Шоккли женится вторично, на Эмми Лэннинг, медицинской сестре по уходу за психическими больными. В молодые годы он был заядлым альпинистом. По словам его второй жены, Шоккли относился к альпинизму не как к форме отдыха, а как к проблеме, которую требовалось решить, и тщательно тренировался, готовя себя к такому решению. В более зрелом возрасте он предпочитал заниматься парусным спортом, плаванием и нырянием за жемчугом.

Кроме Нобелевской премии, Шоккли награжден правительством США медалью «За заслуги» (1946), удостоен премии Морриса Либмана Института радиоинженеров (1952), премии Оливера Бакли по физике твердого тела Американского физического общества (1953), премии Комстока американской Национальной академии наук (1954), медали Холли Американского общества инженеров-механиков (1963), почетной медали Института инженеров по электротехнике и электронике (1980). Он был членом американской Национальной академии наук, Американского физического общества, Американской академии наук и искусств, Института инженеров по электротехнике и электронике[48].

Полупроводниковая электроника радикально отлична от вакуумной. Действие электронных ламп основано на управлении током электронов, идущих от нагреваемого электрода (катода) к собирающему электроду (аноду). Катод нагревается отдельным нагревательным элементом. Для работы такого устройства требуется значительное количество электроэнергии.

В полупроводниках не нужно подводить энергию к нагревателю, чтобы получить свободные электроны, а собирающие электроды могут работать при весьма низких напряжениях.

Сопротивление полупроводников можно контролируемо изменять. Это осуществляется путем легирования полупроводника другими химическими элементами. Более того, выбирая тот или иной материал для легирования, можно задавать нужный вид носителей электрического заряда (положительные или отрицательные). Поясним эту мысль.

Все химические элементы, встречающиеся в природе, можно расположить в последовательный ряд по числу положительных зарядов, начиная с водорода, имеющего один положительный заряд в ядре атома (заряд одного протона), и кончая ураном с 92 протонами. Положительный заряд ядра компенсируется оболочками окружающих его электронов. Электроны внутренних оболочек довольно прочно связаны с ядром. Электроны же наружной оболочки связаны слабее; в качестве валентных электронов они могут участвовать в химических процессах, а в качестве электронов проводимости – переносить электрический заряд (электрический ток в

металлах есть поток электронов). В таких металлах, как медь, электроны внешних оболочек практически свободны и под влиянием очень слабого электрического поля способны переносить колоссальные токи. Внешние электроны в диэлектриках связаны прочно, поэтому диэлектрики практически не проводят электричества. Полупроводники – это промежуточный случай. Согласно распределению Больцмана, число N частиц с энергией дается соотношением:

$$N = A \exp [-E/kT],$$

где A – константа, характеризующая материал, k – постоянная Больцмана ($8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/К), а T – абсолютная температура в кельвинах (К). Отсюда видно, что чем прочнее связь и ниже температура, тем меньше освобождается электронов. Если в кремний, который четырехвалентен, ввести фосфор, сурьму или мышьяк, каждый атом которых имеет пять валентных электронов, то один электрон легирующей примеси будет лишним. Этот избыточный электрон связан слабо и легко может действовать как электрон проводимости. Если же в кремний ввести бор, галлий или алюминий, каждый атом которых имеет три валентных электрона, то для образования всех связей будет не хватать одного электрона. В этом случае перенос тока определяется электронными вакансиями, или «дырками». На самом деле электроны под влиянием электрического поля перескакивают от одной вакантной связи к другой, что можно рассматривать как перемещение дырок в противоположном направлении. Электрический ток при этом направлен так же, как и в случае электронов, но по величине он меньше (у электронных «дырок» противоположный знак заряда и меньшая подвижность). В соответствии с соотношением $np = N^2$ можно произвольно изменять число электронов n или дырок p в единице объема полупроводника, задавая нужное число избыточных доноров или акцепторов электронов. Полупроводники, в которых электронов больше, чем дырок, называются полупроводниками n -типа, а полупроводники, в которых больше дырок, – полупроводниками p -типа. Те носители, которых больше, называются основными носителями, а которых меньше – неосновными. Граница, отделяющая в кристалле область p -типа от области n -типа, называется p - n -переходом.

Полупроводниковые электронные компоненты изготавливаются, в основном, из полупроводниковых материалов. К числу таких компонентов относятся транзисторы, интегральные схемы, оптоэлектронные приборы, сверхвысокочастотные (СВЧ) приборы и выпрямители.

Полупроводник – это материал, который проводит электричество лучше, чем такой диэлектрик, как каучук, но не так хорошо, как хороший проводник, например медь. В отличие от металлов, электропроводность полупроводников с повышением температуры возрастает. К наилучшим полупроводниковым материалам относятся кремний (Si) и германий (Ge); в

числе других можно назвать соединения галлия (Ga), мышьяка (As), фосфора (P) и индия (In). Кремний находит широкое применение в транзисторах, выпрямителях и интегральных схемах. Арсенид галлия (GaAs) обычно используют в СВЧ и оптоэлектронных приборах, а также в интегральных схемах. Полупроводник представляет собой, по существу, диэлектрик, пока в него не введено малое и тщательно дозированное количество некоторого подходящего материала. Например, такой материал, как фосфор, делает кремний проводящим, добавляя в него избыточные электроны (то есть, действуя как «донор»). Кремний, легированный подобным образом, становится кремнием n-типа. Легирование таким материалом, как бор, превращает кремний в материал p-типа: бор (акцептор) отбирает у кремния часть электронов, создавая в нем «дырки», которые могут заполняться электронами расположенных поблизости атомов и повышать тем самым проводимость легируемого материала. (Потоки электронов в одном направлении и дырок в противоположном образуют ток.) Электроны и дырки, обеспечивающие таким образом проводимость, называются носителями заряда.

p-n-переходы. Твердотельные электронные приборы представляют собой, как правило, многослойную структуру (сэндвич), одна часть которой выполнена из полупроводника p-типа, а другая – из полупроводника n-типа. Пограничная область между материалами p-типа и n-типа называется p-n-переходом. Переход образуется положительно заряженными атомами донорной примеси с n-стороны и отрицательно заряженными атомами акцепторной примеси с p-стороны. Электрическое поле, создаваемое этими ионами, предотвращает диффузию электронов в p-область и дырок в n-область.

Если p-область p-n-перехода соединить с положительным выводом какого-либо источника напряжения (например, батареи), а n-область – с отрицательным выводом, то электроны и дырки смогут диффундировать через переход. В результате из p-области в направлении n-области потечет существенный ток. В таком случае говорят, что переход смещен в прямом направлении. При обратном смещении, когда описанные выше подсоединения имеют противоположную полярность, от области n-типа к области p-типа потечет лишь предельно малый обратный ток.

Диоды с p-n-переходом. Диоды – это устройства, которые проводят электрический ток только в одном направлении. Следовательно, p-n-переходы идеально подходят для их использования в диодных выпрямителях, преобразующих переменный ток в постоянный.

Когда напряжение обратного смещения на диоде с p-n-переходом увеличивается до критического значения, называемого напряжением пробоя, электрическое поле в области перехода создает электроны и дырки в результате соударений носителей заряда, обладающих высокой энергией,

с атомами полупроводников. В ходе этого процесса, называемого ионизацией, образуется «лавина» новых носителей, вследствие чего обратный ток при напряжении пробоя существенно возрастает.

Диодные выпрямители обычно работают при обратных напряжениях ниже напряжения пробоя. Однако резкое и значительное нарастание обратного тока, происходящее при достижении напряжения пробоя, можно использовать для стабилизации напряжения или для фиксации опорного уровня напряжения. Диоды, предназначенные для таких применений, называются полупроводниковыми стабилитронами. Емкость, зависящая от приложенного напряжения, соответствует обратному смещенному р-п-переходу. Такую управляемую напряжением емкость можно применять, например, в настраиваемых контурах. Диоды, в которых используются такие переходы, называют варикапами.

Резкие р-п-переходы, имеющие очень малую толщину и сильно легированные с обеих сторон, находят применение в туннельных диодах, т.е. диодах, в которых электроны могут «туннелировать» сквозь переход. Туннелирование – это квантовомеханический процесс, позволяющий некоторым электронам проходить сквозь потенциальный барьер. Как при обратном, так и при прямом смещении туннельный диод пропускает ток при очень низком напряжении. Но при некотором критическом значении напряжения прямого смещения эффект туннелирования уменьшается, и, в конечном счете, преобладающим становится прямой ток от р-области к п-области. Ток, обусловленный туннелированием, продолжает уменьшаться, пока напряжение повышается от критического уровня до некоторого более высокого значения. В этом диапазоне напряжений, где происходит уменьшение туннелирования, возникает отрицательное сопротивление, которое можно использовать в различных типах переключателей, автогенераторов, усилителей и других электронных устройств.

р-п-переход может также находить применение в структуре фотодиода или солнечного элемента (фотоэлектрического перехода). Когда свет, который состоит из фотонов, освещает р-п-переход, атомы полупроводника поглощают фотоны, в результате чего образуются дополнительные пары электронов и дырок. Поскольку эти дополнительные носители собираются в области перехода, от п-области в р-область течет избыточный ток. Величина этого обратного тока пропорциональна скорости, с которой генерируются дополнительные носители, а эта скорость, в свою очередь, зависит от интенсивности падающего света.

В фотодиодах этот обратный ток при фиксированном напряжении обратного смещения зависит от интенсивности освещения. Поэтому фотодиоды часто используют в фотометрах и системах распознавания символов.

Полученную от р-п-перехода энергию солнечные элементы передают в подключенную к ним внешнюю нагрузку. Солнечные элементы, преобразующие солнечный свет в электричество, находят широкое применение в качестве источников электропитания для искусственных спутников Земли и в некоторых применениях на Земле.

Во многих полупроводниковых материалах, таких, как арсенид галлия (GaAs), фосфид галлия (GaP) и фосфид индия (InP), электроны и дырки рекомбинируют друг с другом в области р-п-перехода, смещенного в прямом направлении, излучая свет. Длина волны излучения зависит от используемого материала; обычно спектр излучения находится в пределах от инфракрасного (как в случае GaAs) до зеленого (как для GaP) участков. При надлежащем выборе материалов можно изготовить такие светоизлучающие диоды (СИД), которые будут давать излучение практически любого цвета (длины волны). Такие светодиоды применяют в цифровых наручных часах и в индикаторах электронных калькуляторов. Инфракрасные светодиоды могут использоваться в оптических системах связи, в которых световые сигналы, посылаемые по волоконно-оптическим кабелям, детектируются фотодиодами. Оптоэлектронные системы такого рода могут быть весьма эффективными, если используются светодиоды лазерного типа, а фотоприемники работают в лавинном режиме с обратным смещением.

р-п-переходы используются также в транзисторах и более сложных транзисторных структурах – интегральных схемах.

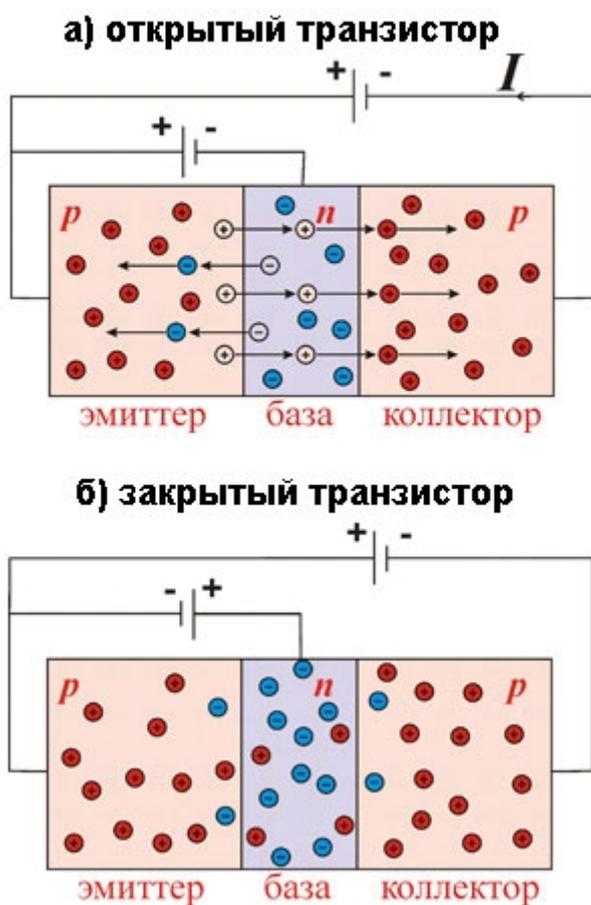


Рис. 1. Электронно-дырочный переход и транзистор

Отличительным свойством полупроводниковых кристаллов является наличие в них свободных носителей зарядов обоих знаков. Отрицательные заряды — это электроны, освободившиеся с внешних оболочек атомов кристаллической решетки, а положительные — так называемые дырки. Дырки — это вакантные места, остающиеся в электронных оболочках после ухода из них электронов. При переходе на такое вакантное место электрона из оболочки соседнего атома дырка перемещается к этому атому и таким образом может двигаться по всему кристаллу, как свободная клетка при игре в пятнашки. Поэтому можно рассматривать дырку как положительно заряженную свободную частицу.

Биполярный транзистор — это полупроводниковый кристалл, разделенный на три части, которые называются эмиттером, базой и коллектором (рис.1). За счет введения в эти области различных примесей соотношение свободных дырок и электронов в них различно. Так, в эмиттере и коллекторе дырок существенно больше, чем электронов (говорят, что эти области обладают проводимостью p-типа). В базе же, наоборот, больше электронов (проводимость n-типа).

Пусть как на коллектор, так и на базу транзистора подан отрицательный

потенциал относительно эмиттера — на базу меньший, на коллектор больший (рис 1.а). Тогда электрическое поле на контакте база—эмиттер направлено слева направо и способствует движению дырок из эмиттера в базу, а электронов — наоборот, из базы в эмиттер. Поле на контакте база—коллектор направлено также направо и препятствует переходу дырок из коллектора в базу и электронов из базы в коллектор. Однако дырки, попавшие в базу из эмиттера, под действием этого поля свободно проходят в коллектор. Обычно базу делают достаточно тонкой, поэтому в коллектор переходят практически все дырки из эмиттера, и в коллекторной цепи течет достаточно большой ток.

Теперь предположим, что потенциал базы относительно эмиттера стал положительным, а потенциал коллектора по-прежнему отрицателен (рис. 1 б). Тогда электрическое поле на контакте эмиттер—база направлено налево, а на контакте база—коллектор — направо. Таким образом, поле препятствует выходу электронов из базы в обе стороны, так же как и попаданию в нее дырок. Поэтому через контакты течет только ток, связанный с движением неосновных зарядов — дырок в базе и электронов в эмиттере и коллекторе. Так как число таких зарядов весьма невелико по сравнению с основными, то и ток в этом случае пренебрежимо мал.

Тем самым, варьируя напряжение между базой и эмиттером, можно изменять значение коллекторного тока от максимального до почти нулевого, то есть «открывать» и «закрывать» транзистор. Это значит, что транзистор, как и вакуумный триод, может выполнять функцию «электронного вентиля».

В биполярном транзисторе носителями заряда служат как электроны, так и дырки. В нем имеются два близко расположенных и включенных навстречу друг другу перехода, которые образуют тем самым три отдельных слоя р-п-р- либо п-р-п-структуры. В р-п-р-транзисторе р-область, служащая слоем ввода, называется эмиттером; центральная п-область является базой; р-область, служащая выводом, называется коллектором. В п-р-п-транзисторе р- и п-области меняются местами. В р-п-р-транзисторе дырки инжектируются через эмиттерный переход, смещенный в прямом направлении, и собираются на коллекторном переходе, смещенном в обратном направлении; в п-р-п-приборе то же самое происходит с электронами. Количество инжектируемых и собираемых носителей заряда можно менять путем изменения малого тока, подаваемого в область базы. В результате на $R_{\text{н}}$ можно получать электрические сигналы, мощность которых будет во много раз превосходить мощность, затраченную в цепи ЭП. Подобные же физические процессы происходят и в транзисторе р—п—р-типа (рис. 1, б), но в нём электроны и дырки меняются ролями, а полярности приложенных напряжений должны быть изменены на обратные. Эмиттер в транзисторе может выполнять функции коллектора, а коллектор — эмиттера (в симметричных транзисторах), для этого достаточно изменить полярность соответствующих напряжений.

В соответствии с механизмом переноса не основных носителей через базу различают бездрейфовые транзисторы, в базе которых ускоряющее электрическое поле отсутствует и заряды переносятся от эмиттера к коллектору за счёт диффузии, и дрейфовые транзисторы, в которых действуют одновременно два механизма переноса зарядов в базе: их диффузия и дрейф в электрическом поле. По электрическим характеристикам и областям применения различают транзисторы маломощные малошумящие (используются во входных цепях радиоэлектронных усилительных устройств), импульсные (в импульсных электронных системах), мощные генераторные (в радиопередающих устройствах), ключевые (в системах автоматического регулирования в качестве электронных ключей), фототранзисторы (в устройствах, преобразующих световые сигналы в электрические с одновременным усилением последних) и специальные. Различают также низкочастотные транзисторы (в основном для работы в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот), высокочастотные (до 300 МГц) и сверхвысокочастотные (свыше 300 МГц).

Полевой транзистор представляет собой униполярный прибор; это означает, что только основной тип носителей заряда – либо электроны в областях с проводимостью n-типа, либо дырки в областях с проводимостью p-типа – проходят через проводящий канал прибора. Ток в канале изменяется посредством электрического поля, создаваемого напряжением, приложенным к переходу (с обратным смещением) или к изолирующему слою на поверхности прибора.

Биполярный транзистор – это, по существу, прибор, управляемый током, а полевой транзистор – прибор, управляемый напряжением. Оба типа транзисторов широко применяются в схемах микроэлектроники.

p-n-p-n-приборы. Четырехслойная структура, называемая триодным тиристором (SCR), представляет собой наиболее важный тип приборов со структурой p-n-p-n. Другие приборы с этой структурой – двухвыводной и двусторонней диоды.

Тиристор представляет собой эффективный переключатель, позволяющий работать со значительными уровнями мощностей. При прямом напряжении на тиристоре переход В имеет смещение в обратном направлении, так что тока через него практически нет. Но когда напряжение смещения в прямом направлении увеличивается до некоторого критического уровня, на переходе В развивается лавинный процесс. Носители заряда инжектируются затем в средние области N и P, вызывая диффузию дырок на переходе А р-n-p-структуры и диффузию электронов на переходе С n-p-n-структуры. В результате ток увеличивается, и падение напряжения на приборе становится малым. Этот процесс можно инициировать при меньшем прямом смещении, инжектируя небольшой ток в одну из точек

слоя р управляющего электрода. Отсюда следует, что SCR может служить почти идеальным переключателем, в котором практически не протекает ток в закрытом состоянии, но в открытом состоянии течет значительный ток при низком напряжении. Приборы SCR широко используются в схемах управления электродвигателями и печами, в регуляторах освещения и других применениях.

Сверхвысокочастотные приборы. Транзисторы находят также широкое применение в СВЧ-технике. К тому же сверхвысокие частоты можно генерировать с помощью полупроводниковых компонентов, имеющих всего два вывода, но обладающих отрицательным сопротивлением, подобно туннельным диодам. К наиболее распространенным СВЧ-приборам такого типа относятся лавинно-пролетные диоды и диоды Ганна.

В лавинно-пролетном диоде при лавинном пробое в обратносмещенном р-п-переходе возникают избыточные носители в области дрейфа, т.е. в области, где носители заряда движутся под влиянием приложенного напряжения. Если размер области дрейфа выбран правильно, то избыточные носители проходят ее на протяжении отрицательного полупериода напряжения переменного тока. Далее ток увеличивается при уменьшении напряжения. При этом существует своего рода отрицательная проводимость, которую можно использовать в объемном резонаторе для генерации СВЧ-колебаний.

Принцип действия **диода Ганна** основан на свойстве таких полупроводников, как GaAs и InP, вызывать замедление электронов в материале при некоторой критической напряженности электрического поля. В соответствии с законом Ома ток при слабых полях пропорционален напряженности поля. Однако при очень сильных полях (с напряженностью порядка нескольких тысяч вольт на сантиметр) энергии электронов в GaAs или InP возрастают до величин, при которых свобода движения электронов в полупроводниковом кристалле ограничивается. Вследствие их пониженной подвижности при превышении напряженностью электрического поля некоторого критического уровня электроны еще более замедляются. Как и в лавинно-пролетном диоде, здесь возникает некоторая разновидность отрицательной проводимости, которую можно использовать для генерации СВЧ-колебаний.

Полевой транзистор, каналный транзистор, полупроводниковый прибор, в котором ток изменяется в результате действия перпендикулярного току электрического поля, создаваемого входным сигналом. Протекание в полевом транзисторе рабочего тока обусловлено носителями заряда только одного знака (электронами или дырками), поэтому такие приборы называются униполярными (в отличие от биполярных). По физической структуре и механизму работы Полевые транзисторы условно делят на 2 группы. Первую образуют полевые транзисторы с управляющим р—п-переходом или переходом

металл — полупроводник, т. н. барьером Шотки, вторую — полевые транзисторы с управлением посредством изолированного электрода (затвора), т. н. транзисторы МДП (металл — диэлектрик — полупроводник). В последних в качестве диэлектрика используют окисел кремния (МОП-транзистор) или слоистые структуры, например SiO_2 — Al_2O_3 (МАОП-транзистор), SiO_2 — Si_3N_4 (МНОП-транзистор) и другие. К полевым транзисторам с изолированным затвором относят также полевой транзистор с так называемым плавающим затвором и полевой транзистор с накоплением заряда в изолированном затворе (их применяют как элементы электронной памяти). В полевых транзисторах в качестве полупроводника используют в основном Si и GaAs, в качестве металлов, образующих переход, — Al, Mo, Au. Полевые транзисторы были созданы в 50—70-е годы XX века на основе работ американских учёных У. Шокли, С. Мида, Д. Канга, М. Аталлы и др. Полевые транзисторы широко применяют в электронной аппаратуре для усиления электрических сигналов по мощности и напряжению. Полевые транзисторы — твердотельные аналоги электронных ламп, они характеризуются аналогичной системой параметров — крутизной характеристики (0,1—400 мА/В), напряжением отсечки (0,5—20 В), входным сопротивлением по постоянному току (10^{11} — 10^{16} Ом) и т.д.

Полевой транзистор с управляющим p—n-переходом обладают наиболее низким среди полупроводниковых приборов уровнем шумов (являющихся в основном тепловыми шумами) в широком диапазоне частот — от инфранизких до СВЧ (коэффициент шума лучших полевых транзисторов < 0,1 дБ на частоте 10 Гц и ~ 2 дБ на частоте 400 МГц). Мощность рассеяния полевых транзисторов такого типа может достигать нескольких десятков Вт. Их основной недостаток — относительно высокая проходная ёмкость, требующая нейтрализации её при большом усилении. В полевом транзисторе с переходом металл — полупроводник достигнуты наиболее высокие рабочие частоты (максимальная частота усиления по мощности лучших полевых транзисторов на арсениде галлия превышает 40 ГГц). Полевой транзистор с изолированным затвором обладают высоким входным сопротивлением по постоянному току (до 10^{16} Ом, что на 2—3 порядка выше, чем у других полевых транзисторов, и сравнимо с входным сопротивлением лучших электрометрических ламп). В области СВЧ усиление и уровень шумов у этих полевых транзисторов такие же, как и у биполярных транзисторов (предельная частота усиления по мощности около 10 ГГц, коэффициент шума на частоте 2 ГГц около 3,5 дБ и динамический диапазон > 100 дБ), однако они превосходят последние по параметрам избирательности и помехоустойчивости (благодаря строгой квадратичности передаточной характеристики). Относительная простота изготовления (по планарной технологии) и схемные особенности построения позволили использовать их в больших интегральных схемах (БИС) устройств вычислительной техники (например, созданы большие интегральные схемы, содержащие более 10 тысяч МДП-транзисторов в одном кристалле).

Полупроводники находят также применение во многих других электронных приборах; постоянно разрабатываются все новые и новые приборы и устройства. В качестве примера можно привести диод Шоттки, диод со сплавным переходом, полевой транзистор с р-n-переходом и прибор с зарядовой связью (ПЗС).

С помощью современных технологий изготовить транзистор гораздо проще, чем вакуумный триод. Транзистор можно сделать очень маленьким, а значит, быстрым в работе и потребляющим малую мощность. Из-за этих преимуществ современные компьютеры производятся на транзисторах, а не на лампах. Изобретение интегральных микросхем, способных объединить на одном кристалле миллионы транзисторов, прочно закрепило их преимущество перед лампами.

В электронике полупроводниковые приборы служат для преобразования различных сигналов, в энергетике — для непосредственного преобразования одних видов энергии в другие. Известно много разнообразных способов классификации полупроводниковые приборы, например по назначению и принципу действия, по типу материала, конструкции и технологии, по области применения. Однако к основным классам полупроводниковые приборы относят следующие: электропреобразовательные приборы, преобразующие одни электрические величины в др. электрические величины (полупроводниковый диод, транзистор, тиристор); оптоэлектронные приборы, преобразующие световые сигналы в электрические и наоборот (оптрон, фоторезистор, фотодиод, фототранзистор, фототиристор, полупроводниковый лазер, светоизлучающий диод, твердотельный преобразователь изображения — аналог видикона и т.п.); термоэлектрические приборы, преобразующие тепловую энергию в электрическую и наоборот (термоэлемент, термоэлектрический генератор, солнечная батарея, термистор и т.п.); магнитоэлектрические приборы (датчик, использующий Холла эффект, и т.п.); пьезоэлектрический и тензометрический приборы, которые реагируют на давление или механическое смещение. К отдельному классу полупроводниковых приборов следует отнести интегральные схемы, которые могут быть электропреобразующими, оптоэлектронными и т.д. либо смешанными, сочетающими самые различные эффекты в одном приборе. Электропреобразовательные полупроводниковые приборы — наиболее широкий класс приборов, предназначенных для преобразования (по роду тока, частоте и т.д.), усиления и генерирования электрических колебаний в диапазоне частот от долей гц до 100 ГГц и более; их рабочие мощности находятся в пределах от $< 10^{-12}$ Вт до нескольких сотен Вт, напряжения — от долей Вольта до нескольких тысяч Вольт и ток — от нескольких наноампер до нескольких тысяч Ампер. В зависимости от применяемого полупроводникового материала различают германиевые, кремниевые и другие полупроводниковые приборы. По конструктивным и технологическим признакам полупроводниковые приборы разделяют на точечные и плоскостные; последние, в свою очередь,

делят на сплавные, диффузионные, мезапланарные, планарные (наиболее распространены), эпитанарные и другие. В соответствии с областью применения различают высокочастотные, высоковольтные, импульсные и др. полупроводниковые приборы.

Полупроводниковые приборы выпускают в металлостеклянных, металлокерамических или пластмассовых корпусах, защищающих приборы от внешних воздействий; для использования в гибридных интегральных схемах выпускаются т. н. бескорпусные полупроводниковые приборы. Во всех странах мира выпускается около 100 000 типов приборов различного назначения. В качестве полупроводниковых материалов для изготовления транзисторов используют преимущественно германий и кремний. В соответствии с технологией получения в кристалле зон с различными типами проводимости транзисторы делят на сплавные, диффузионные, конверсионные, сплавно-диффузионные, мезатранзисторы, эпитаксиальные, планарные и планарно-эпитаксиальные. По конструктивному исполнению транзисторы подразделяются на транзисторы в герметичных металлостеклянных, металлокерамических или пластмассовых корпусах и бескорпусные; последние имеют временную защиту кристалла от воздействия внешней среды (тонкий слой лака, смолы, легкоплавкого стекла) и герметизируются совместно с устройством, в котором их устанавливают. Наибольшее распространение получили планарные и планарно-эпитаксиальные кремниевые транзисторы.

С изобретением транзистора наступил период миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры на базе достижений быстро развивающейся полупроводниковой электроники. По сравнению с радиоэлектронной аппаратурой первого поколения (на электронных лампах) аналогичная по назначению радиоэлектронная аппаратура второго поколения (на полупроводниковых приборах, в том числе на транзистор) имеет в десятки и сотни раз меньшие габариты и массу, более высокую надёжность и потребляет значительно меньшую электрическую мощность. Размеры полупроводникового элемента современного транзистор весьма малы: даже в самых мощных транзисторов площадь кристалла не превышает нескольких мм². Надёжность работы транзистора (определяется по среднему статистическому времени наработки на один отказ) характеризуется значениями $\sim 10^5$ часов, достигая в отдельных случаях 10^6 часов. В отличие от электронных ламп транзистор могут работать при низких напряжениях источников питания (до нескольких десятых долей в), потребляя при этом токи в несколько мкА. Мощные транзисторы работают при напряжениях 10—30 В и токах до нескольких десятков ампер, отдавая в нагрузку мощность до 100 Вт и более. Верхний предел диапазона частот усиливаемых транзистором сигналов достигает 10 ГГц, что соответствует длине волны электромагнитных колебаний 3 см. По шумовым характеристикам в области низких частот транзистор успешно конкурируют с малошумящими электрометрическими лампами. В области частот до 1 ГГц транзистор обеспечивают значение коэффициента шума не свыше 1,5—3,0 дБ. На более высоких частотах

коэффициент шума возрастает, достигая 6—10 дБ на частотах 6—10 ГГц.

Транзистор является основным элементом современных микроэлектронных устройств. Успехи планарной технологии позволили создавать на одном кристалле полупроводника площадью 30—35 мм² электронные устройства, насчитывающие до нескольких десятков тысяч транзисторов. Такие устройства, получившие название интегральных микросхем (ИС), являются основой радиоэлектронной аппаратуры третьего поколения. Примером такой аппаратуры могут служить наручные электронные часы, содержащие от 600 до 1500 транзисторов, и карманные электронные вычислительные устройства (несколько тысяч транзисторов). Переход к использованию ИС определил новое направление в конструировании и производстве малогабаритной и надёжной радиоэлектронной аппаратуры, получившее название микроэлектроники. Достоинства транзисторов в сочетании с достижениями технологии их производства позволяют создавать ЭВМ, насчитывающие до нескольких миллионов элементов, размещать сложные электронные устройства на борту самолётов и космических летательных аппаратов, изготавливать малогабаритную радиоэлектронную аппаратуру для использования в самых различных областях промышленности, в медицине, быту и так далее. Наряду с достоинствами транзистор, как и другие полупроводниковые приборы, имеют ряд недостатков. В первую очередь — ограниченный диапазон рабочих температур. Так, германиевые Транзистор работают при температурах не свыше 100°С, кремниевые 200°С. К недостаткам транзисторов относятся также существенные изменения их параметров с изменением рабочей температуры и довольно сильная чувствительность к ионизирующим излучениям.

Следующий важнейший шаг в развитии физики твёрдого тела и ее приложении к электронной технике был сделан Ж.И.Алферовым.

Жорес Иванович Алфёров родился 15 марта 1930 года в белорусском городе Витебске. После 1935 года семья переехала на Урал. В г. Туринске Алфёров учился в школе с пятого по восьмой классы. 9 мая 1945 года его отец, Иван Карпович Алфёров, получил назначение в Минск, где Алфёров окончил мужскую среднюю школу №42 с золотой медалью. По совету школьного учителя физики, Якова Борисовича Мельцерзона. Алфёров поступил на факультет электронной техники (ФЭТ) Ленинградского электротехнического института (ЛЭТИ) имени В.И. Ульянова. На третьем курсе Алфёров пошел работать в вакуумную лабораторию профессора Б.П. Козырева. Там он начал экспериментальную работу под руководством Наталии Николаевны Созиной. Со студенческих лет Алфёров привлекал к участию в научных исследованиях других студентов. Так в 1950 году полупроводники стали главным делом его жизни.

В 1953 году, после окончания ЛЭТИ, Алфёров был принят на работу в Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе в лабораторию

В.М. Тучкевича. В первой половине 50-х годов перед институтом была поставлена задача: создать отечественные полупроводниковые приборы для внедрения в отечественную промышленность. Перед лабораторией стояла задача: получение монокристаллов чистого германия и создание на его основе плоскостных диодов и триодов. При участии Алферова были разработаны первые отечественные транзисторы и силовые германиевые приборы. За комплекс проведенных работ в 1959 году Алферов получил первую правительственную награду, а также им была защищена кандидатская диссертация, подводившая черту под десятилетней работой.

После этого перед Ж.И. Алфёровым встал вопрос о выборе дальнейшего направления исследований. Накопленный опыт позволял ему перейти к разработке собственной темы. В те годы была высказана идея использования в полупроводниковой технике гетеропереходов. Создание совершенных структур на их основе могло привести к качественному скачку в физике и технике. В то время во многих журнальных публикациях и на различных научных конференциях неоднократно говорилось о бесперспективности проведения работ в этом направлении, т.к. многочисленные попытки реализовать приборы на гетеропереходах не приходили к практическим результатам. Причина неудач крылась в трудности создания близкого к идеальному перехода, выявлении и получении необходимых гетеропар.

Но это не остановило Жореса Ивановича. В основу технологических исследований им были положены эпитаксиальные методы, позволяющие управлять такими фундаментальными параметрами полупроводника, как ширина запрещенной зоны, величина электронного сродства, эффективная масса носителей тока, показатель преломления и т.д. внутри единого монокристалла.

Для идеального гетероперехода подходили GaAs и AlAs, но последний почти мгновенно на воздухе окислялся. Значит, следовало подобрать другого партнера. И он нашелся тут же, в институте, в лаборатории, возглавляемой Н.А. Горюновой. Им оказалось тройное соединение AlGaAs. Так определилась широко известная теперь в мире микроэлектроники гетеропара GaAs/AlGaAs. Ж.И. Алфёров с сотрудниками не только создали в системе AlGaAs – GaAs гетероструктуры, близкие по своим свойствам к идеальной модели, но и первый в мире полупроводниковый гетеролазер, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре.

Открытие Ж.И. Алфёровым идеальных гетеропереходов и новых физических явлений – «суперинжекции», электронного и оптического ограничения в гетероструктурах – позволило также кардинально улучшить параметры большинства известных полупроводниковых

приборов и создать принципиально новые, особенно перспективные для применения в оптической и квантовой электронике. Новый этап исследований гетеропереходов в полупроводниках Жорес Иванович обобщил в докторской диссертации, которую успешно защитил 1970 году.

Работы Ж.И. Алфёрова были по заслугам оценены международной и отечественной наукой. В 1971 году Франклиновский институт (США) присуждает ему престижную медаль Баллантайна, называемую «малой Нобелевской премией» и учрежденную для награждения за лучшие работы в области физики. Затем следует самая высокая награда СССР – Ленинская премия (1972 год).

С использованием разработанной Ж.И. Алфёровым в 70-х годах технологии высокоэффективных, радиационностойких солнечных элементов на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур в России (впервые в мире) было организовано крупномасштабное производство гетероструктурных солнечных элементов для космических батарей. Одна из них, установленная в 1986 году на космической станции «Мир», проработала на орбите весь срок эксплуатации без существенного снижения мощности.

На основе предложенных в 1970 году Ж.И. Алфёровым и его сотрудниками идеальных переходов в многокомпонентных соединениях InGaAsP созданы полупроводниковые лазеры, работающие в существенно более широкой спектральной области, чем лазеры в системе AlGaAs. Они нашли широкое применение в качестве источников излучения в волоконно-оптических линиях связи повышенной дальности.

В начале 90-х годов одним из основных направлений работ, проводимых под руководством Ж.И. Алфёрова, становится получение и исследование свойств наноструктур пониженной размерности: квантовых проволок и квантовых точек.

В 1993-94 годах впервые в мире реализуются гетеролазеры на основе структур с квантовыми точками – «искусственными атомами». В 1995 году Ж.И. Алфёров со своими сотрудниками впервые демонстрирует инжекционный гетеролазер на квантовых точках, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре. Принципиально важным стало расширение спектрального диапазона лазеров с использованием квантовых точек на подложках GaAs. Таким образом, исследования Ж.И. Алфёрова заложили основы принципиально новой электроники на основе гетероструктур с очень широким диапазоном применения, известной сегодня как «зонная инженерия».

В одном из своих многочисленных интервью (1984 год) на вопрос корреспондента: «По слухам, Вы нынче были представлены к Нобелевской премии. Не обидно, что не получили?» Жорес Иванович ответил: «Слышал,

что представляли уже не раз. Практика показывает – либо ее дают сразу после открытия (в моем случае это середина 70-х годов), либо уже в глубокой старости. Так было с П.Л. Капицей. Значит, у меня еще все впереди».

Здесь Жорес Иванович ошибся. Как говорится, награда нашла героя раньше наступления глубокой старости. 10 октября 2000 года по всем программам российского телевидения сообщили о присуждении Ж.И. Алфёрову Нобелевской премии по физике за 2000 год.

«Современные информационные системы должны отвечать двум простым, но основополагающим требованиям: быть быстрыми, чтобы большой объем информации, можно было передать за короткий промежуток времени, и компактными, чтобы уместиться в офисе, дома, в портфеле или кармане.

Своими открытиями Нобелевские лауреаты по физике за 2000 год создали основу такой современной техники. Жорес И. Алфёров и Герберт Кремер открыли и развили быстрые опто- и микроэлектронные компоненты, которые создаются на базе многослойных полупроводниковых гетероструктур. Гетеролазеры передают, а гетероприемники принимают информационные потоки по волоконно-оптическим линиям связи. Гетеролазеры можно обнаружить также в проигрывателях CD-дисков, устройствах, декодирующих товарные ярлыки, в лазерных указках и во многих других приборах. На основе гетероструктур созданы мощные высокоэффективные светоизлучающие диоды, используемые в дисплеях, лампах тормозного освещения в автомобилях и светофорах. В гетероструктурных солнечных батареях, которые широко используются в космической и наземной энергетике, достигнуты рекордные эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую.

Джек Килби награжден за свой вклад в открытие и развитие интегральных микросхем, благодаря чему стала быстро развиваться микроэлектроника, являющаяся – наряду с оптоэлектроникой – основой всей современной техники».

В 1973 году Алфёровым, при поддержке ректора ЛЭТИ А.А. Вавилова, организовал базовую кафедру оптоэлектроники (ЭО) на факультете электронной техники Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе.

В невероятно сжатые сроки Ж.И. Алфёров совместно с Б.П. Захарченей и другими учеными Физтеха разработал учебный план подготовки инженеров по новой кафедре. Он предусматривал обучение студентов первого и второго курсов в стенах ЛЭТИ, поскольку уровень физико-математической подготовки на ФЭТ был высоким и создавал хороший

фундамент для изучения специальных дисциплин, которые, начиная с третьего курса, читались учеными Физтеха на его территории. Там же с использованием новейшего технологического и аналитического оборудования выполнялись лабораторные практикумы, а также курсовые и дипломные проекты под руководством преподавателей базовой кафедры.

Прием студентов на первый курс в количестве 25 человек осуществлялся через вступительные экзамены, а комплектование групп второго и третьего курсов для обучения по кафедре ОЭ проходило из студентов, обучавшихся на ФЭТ и на кафедре диэлектриков и полупроводников Электрофизического факультета. Комиссию по отбору студентов возглавлял Жорес Иванович. Из примерно 250 студентов, обучавшихся на каждом курсе, было отобрано по 25 лучших. 15 сентября 1973 года начались занятия студентов вторых и третьих курсов. Для этого был подобран прекрасный профессорско-преподавательский состав.

Ж.И. Алфёров очень большое внимание уделял и уделяет формированию контингента студентов первого курса. По его инициативе в первые годы работы кафедры в период весенних школьных каникул проводились ежегодные школы «Физика и жизнь». Ее слушателями были учащиеся выпускных классов школ Ленинграда. По рекомендации учителей физики и математики наиболее одаренным школьникам вручались приглашения принять участие в работе этой школы. Таким образом, набиралась группа в количестве 30...40 человек. Они размещались в институтском пионерском лагере «Звездный». Все расходы, связанные с проживанием, питанием и обслуживанием школьников, наш вуз брал на себя.

На открытие школы приезжали все ее лекторы во главе с Ж.И. Алфёровым. Все проходило и торжественно, и очень по-домашнему. Первую лекцию читал Жорес Иванович. Он так увлекательно говорил о физике, электронике, гетероструктурах, что все его слушали как замороженные. Но и после лекции не прекращалось общение Ж.И. Алфёрова с ребятами. Окруженный ими, он ходил по территории лагеря, играл в снежки, дурачился. Насколько не формально он относился к этому «мероприятию», говорит тот факт, что в эти поездки Жорес Иванович брал свою жену Тамару Георгиевну и сына Ваню...

Результаты работы школы не замедлили сказаться. В 1977 году состоялся первый выпуск инженеров по кафедре ОЭ, количество выпускников, получивших дипломы с отличием, на факультете удвоилось. Одна группа студентов этой кафедры дала столько же «красных» дипломов, сколько остальные семь групп.

В 1988 году Ж.И. Алфёров организовал в Политехническом институте физико-технический факультет. Следующим логическим шагом стало объединение этих структур под одной крышей. К реализации данной идеи

Ж.И. Алфёров приступил еще в начале 90-х годов. При этом он не просто строил здание Научно-образовательного центра, он закладывал фундамент будущего возрождения страны... И вот первого сентября 1999 года здание Научно-образовательного центра (НОЦ) вступило в строй.

Свою Нобелевскую премию Жорес Иванович потратил на поддержку фундаментальных исследований молодых ученых.

Алфёров всегда остается самим собой. В общении с министрами и студентами, директорами предприятий и простыми людьми он одинаково ровен. Не подстраивается под первых, не возвышается над вторыми, но всегда с убежденностью отстаивает свою точку зрения.

Ж.И. Алфёров всегда занят. Его рабочий график расписан на месяц вперед, а недельный рабочий цикл таков: утро понедельника – Физтех (он его директор), вторая половина дня – Санкт-Петербургский научный центр (он председатель); вторник, среда и четверг – Москва (он член Государственной думы и вице-президент РАН, к тому же нужно решать многочисленные вопросы в министерствах) или Санкт-Петербург (тоже вопросов выше головы); утро пятницы – Физтех, вторая половина дня – Научно-образовательный центр (директор). Это только крупные штрихи, а между ними – научная работа, руководство кафедрой ОЭ в ЭТУ и физико-техническим факультетом в ТУ, чтение лекций, участие в конференциях. Всего не перечесать!

Наш лауреат прекрасный лектор и рассказчик. Неслучайно все информационные агентства мира отметили именно Алфёровскую Нобелевскую лекцию, которую он прочитал на английском языке без конспекта и с присущим ему блеском.

При вручении Нобелевских премий существует традиция, когда на банкете, который устраивает король Швеции в честь Нобелевских лауреатов (на нем присутствуют свыше тысячи гостей), представляется слово только одному лауреату от каждой «номинации». В 2000 году Нобелевской премии по физике были удостоены три человека: Ж.И. Алфёров, Герберт Кремер и Джек Килби. Так вот двое последних уговорили Жореса Ивановича выступить на этом банкете. И он эту просьбу выполнил блестяще, в своем слове удачно обыграв нашу российскую привычку делать «одно любимое дело» на троих.

В своей книге «Физика и жизнь» Ж.И. Алфёров, в частности, пишет: «Все, что создано человечеством, создано благодаря науке. И если уж суждено нашей стране быть великой державой, то она ею будет не благодаря ядерному оружию или западным инвестициям, не благодаря вере в Бога или Президента, а благодаря труду ее народа, вере в знание, в науку, благодаря сохранению и развитию научного потенциала и образования.

Десятилетним мальчиком я прочитал замечательную книгу Вениамина Каверина «Два капитана». И всю последующую жизнь я следовал принципу ее главного героя Сани Григорьева: «Бороться и искать, найти и не сдаваться». Правда, очень важно при этом понимать, за что ты берешься»[2-4,48].

Крёмер Герберт (Kroemer Herbert) - американский физик немецкого происхождения. Родился 25 августа 1928 года в Веймаре (Германия) В 1947 году Крёмер поступил в Йенский университет. В 1948 году бежал от репрессий в Западный Берлин, и с помощью А.Кёнига и В.Паули поступил в Гёттингенский университет. С 1952 года работал в Центральной лаборатории телекоммуникаций Почтовой службы Германии. В настоящее время Крёмер работает в Университете штата Калифорния в Санта-Барбаре.

Изучал взаимодействие двух периодических потенциалов на границе двух сред с разными электрическими свойствами В 1954 году он опубликовал статью, содержащую самые первые соображения о биполярных транзисторах на гетероструктурах, и в том же году он был приглашен на работу в телерадиокомпанию RCA в Принстоне (США). Ввел представление о квазиэлектрических полях, которое считает фундаментальным принципом разработки гетероструктур. В 1963 году предложил защитить гетеропереход другими полупроводниковыми структурами с более широкой запрещенной зоной для получения непрерывную инверсную заселенность при комнатной температуре. В 1968 году Кремер перешел в университет штата Колорадо и 1970-е годы посвятил изучению так называемых квантовых стенок – гетероструктур со специально разработанными запрещенными зонами. Однако в конце 1970-х он вернулся к полупроводниковым приборам на гетероструктурах. В настоящее время его научные интересы сосредоточены на «сверхгетероструктурах»: он участвует в разработке полупроводников, являющихся токопроводами для сверхпроводниковых электродов.

В 1973 году он был удостоен Эберсовской премии Американского института инженеров-электриков (IEEE), в 1982 году – Велькеровской медали Международного симпозиума по GaAs, в 1986 году – премии Мортонна IEEE, в 1994 году– Гумбольдтовской премии и в 2000 году– Нобелевской премии по физике – совместно с Ж.А.Алферовым и Дж. Килби.[48]

Килби Джек Сен-Клер (Kilby Jack Saint Clair) (08.11.1923 - 26.07.2005) , американский физик и инженер. Родился в Джефферсон-Сити (штат Канзас). В 1947 году окончил Иллинойсский университет и поступил на

фирму по производству электронных компонентов в Милуоки. Одновременно окончил вечерний факультет в Висконсинском университете и получил степень магистра. В 1958 году переехал в Даллас (штат Техас) и начал работать в компании «Тексас инструментс», где работал до середины 1980-х годов, а затем остался членом совета директоров.

Пытаясь уменьшить размеры транзистора, Килби выдвинул идею интегральной схемы – множества транзисторов и необходимых элементов электрической цепи на одной подложке, в одном кристалле. Эта идея оказалась революционной. В 1958 году создал первую интегральную микросхему на основе германия (запатентована в 1959 году). Последние научные исследования посвящены цифровой обработке сигналов.

В 1966 году Франклиновский институт наградил Килби медалью Баллантайна, в том же году он получил премию Сарнова, в 1969 году был награжден Национальной медалью за научные достижения, в 1973 году получил премию Зворыкина Национальной инженерной академии, в 1978 году – премию Брунетти Американского института инженеров-электриков (IEEE), в 1982 году его имя было занесено в Национальный зал славы для изобретателей, в 1983 году он получил медаль Холли, в 1986 году – почетную медаль IEEE, в 1990 году – Национальную медаль по технологии, в 1993 году – престижную премию Киото по технологии. В 2000 году Килби был удостоен Нобелевской премии по физике совместно с Ж.И.Алферовым и Г.Крёмером.[45,48]

Гетеропереходом называется контакт двух различных по химическому составу полупроводников (естественно, они различаются ширинами запрещенных зон, постоянными кристаллической решетки и другими параметрами). Полупроводниковая структура с несколькими гетеропереходами называется гетероструктурой. Принято обозначение гетероструктур А/В на основе соединений А и В, а соединения А и В называют гетеропарой. Схематически зонная диаграмма двойной гетероструктуры изображена на рис. 2. Отметим, что носителям заряда (электронам и дыркам) энергетически выгодно находиться в среднем слое. Идея использования структур с гетеропереходами в полупроводниковой электронике была выдвинута уже на заре развития электроники, в начале пятидесятых годов. На ранней стадии изучения гетероструктур важный теоретический вклад в исследования внес Г.Кремер, разделивший с Ж.И.Алферовым Нобелевскую премию. В 1963 году Ж.И.Алферов и Г.Кремер независимо сформулировали концепцию полупроводниковых лазеров на основе двойной гетероструктуры. Вскоре после этого Ж.И.Алферов так описал основные преимущества полупроводниковых лазеров на двойной гетероструктуре: "Области рекомбинации, светового излучения и инверсной населенности совпадают и полностью сосредоточены в среднем слое. Благодаря потенциальным барьерам на

границе полупроводников с различной шириной запрещенной зоны ... рекомбинация в эмитерах равна нулю. Инверсия населенности для получения стимулированного излучения может быть достигнута чисто инжекционным способом (двойная инжекция), и для ее получения не требуется высокого уровня легирования средней области ... Вследствие заметной разницы в диэлектрических постоянных, свет полностью сосредоточен в среднем слое, играющем роль высококачественного волновода...".

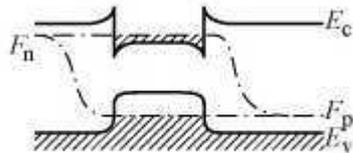


Рис.2. Зонная диаграмма (энергетическая схема) двойной гетероструктуры: внутри полупроводника с большей шириной запрещенной зоны содержится слой (толщиной несколько десятых долей микрона) полупроводника с меньшей шириной запрещенной зоны. E_c - край зоны проводимости, E_v - край валентной зоны. Незаштрихованная часть рисунка между кривыми E_v и F_p - область, заполненная дырками, заштрихованная часть между кривыми E_c и F_n - область, заполненная электронами. F_p и F_n - положение уровня Ферми для дырок и электронов, соответственно.

Однако, хотя высказываемые идеи звучали красиво, их в то время мало кто воспринимал всерьез. Подавляющее большинство исследователей скептически относилось к возможности создания "идеального" гетероперехода с бездефектной границей, считая патент лазера на двойной гетероструктуре пустой бумажкой. Скептицизм этот был понятен. Во-первых, необходимо было найти подходящую гетеропару, то есть два материала с очень близкими постоянными решетки и многими другими хорошо сочетающимися свойствами. Во-вторых, технологии выращивания полупроводниковых структур были далеки от совершенства.

Надо сказать, что практически идеальная гетеропара существовала - еще в 1915 году было получено соединение AlAs, имеющее очень близкий к GaAs период решетки. Однако было известно, что AlAs является химически нестабильным и разлагается во влажной атмосфере, так что возможность изготовления пригодных для практического применения устройств на основе гетероструктур GaAs/AlAs казалась малоперспективной. Поэтому группа Ж.И.Алферова поначалу пыталась реализовать свою идею на основе гетеропары GaAs/GaAsP (GaAsP - трехкомпонентный твердый раствор $GaAs_xP_{1-x}$). Однако из-за некоторого несоответствия параметров решетки лазерную генерацию удавалось получить только при низких температурах. К концу 1966 года стало ясно, что на основе этой гетеропары не удастся реализовать потенциальные преимущества двойной гетероструктуры. Необходимо было искать другие варианты. Как это часто бывает, помог случай: сотрудник группы Ж.И.Алферова, Д.Н.Третьяков, обнаружил, что с

кристаллами твердого раствора AlGaAs, пролежавшими более двух лет в ящике стола, за это время ничего не случилось. Открытие было более чем вдохновляющим, так как гетеропара GaAs/AlGaAs позволяла создать решеточно-согласованную гетероструктуру, т.е. избежать возникновения в структуре напряжений. Это очень важно, потому что при превышении некоторой (зависящей от различия параметров решетки) толщины кристаллической решетке в напряженном среднем слое становится выгодным "отстроиться" от периода решетки окружающего материала. Такое "отстроение" происходит путем образования многочисленных дефектов кристаллической структуры (дислокаций несоответствия), что ведет к резкому ухудшению качества структуры. Надо отметить, что и до сих пор гетеропара GaAs/AlGaAs чаще всего используется в исследованиях свойств низкоразмерных полупроводниковых структур.

Исследование свойств гетероперехода GaAs/AlGaAs и усовершенствование технологии выращивания структур - жидкофазной эпитаксии - дало возможность уже в 1970 году реализовать непрерывный режим лазерной генерации (рис. 3) при комнатной температуре. Сообщение об этом вызвало взрыв интереса к физике и технологии полупроводниковых гетероструктур (в настоящий момент большинство исследователей, работающих в области физики полупроводников, занимаются именно полупроводниковыми гетероструктурами). Практически в то же время было найдено решение, сильно расширяющее возможности подбора решеточно-согласованных гетеропар - использование четверных твердых растворов (в начале исследовались различные составы InGaAsP). Действительно, каждое из соединений (в данном случае - InAs, GaAs, InP, GaP) имеет свою ширину запрещенной зоны и постоянную решетки. Если на графике, по одной из осей которого отложена постоянная решетки, а по другой - ширина запрещенной зоны, поставить четыре точки, соответствующие параметрам этих соединений, то они образуют четырехугольник. Меняя состав четырехкомпонентного раствора $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ (x и y - доли различных компонент), можно получать любые значения постоянной решетки и ширины запрещенной зоны в пределах этого четырехугольника.

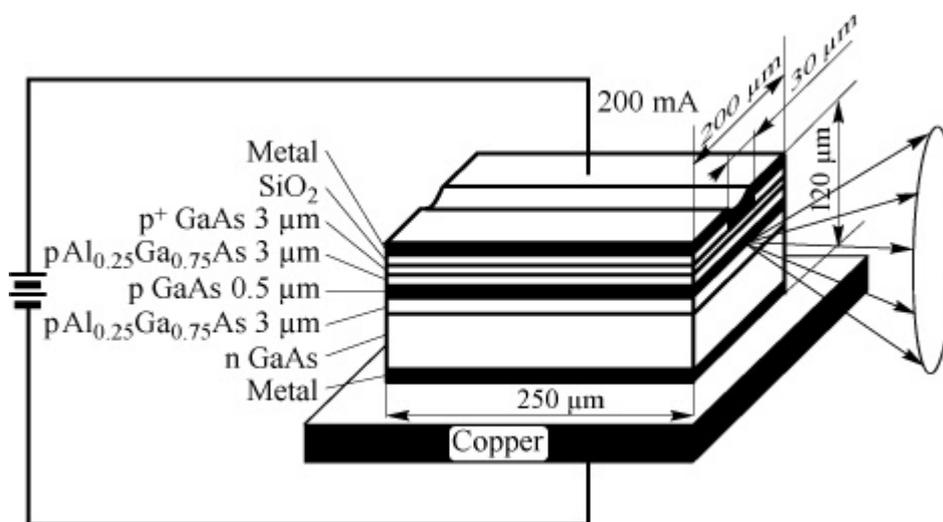


Рис. 3. Схематическое изображение первого в мире полупроводникового лазера (полоскового), работавшего в непрерывном режиме при комнатной температуре.

В том же 1970 году случилось другое важное событие, появилась работа Л.Эсаки и Р.Цу, посвященная исследованию свойств сверхрешеток - нового вида полупроводниковых гетероструктур. Основным мотивом их деятельности было желание реализовать на базе подобных структур "блоховский осциллятор", или, если подойти к вопросу с практической стороны, создать сверхвысокочастотный генератор. Так было положено начало новому разделу физики полупроводников - физике низкоразмерных структур.

Но прежде чем рассказать о том, что же представляет собой сверхрешетка, разберемся с более простой структурой. На рис 2. изображена обычная двойная гетероструктура. Проведем небольшой мысленный эксперимент: будем уменьшать толщину среднего слоя. Неизбежно наступит момент, когда квазичастицы (электроны и дырки) почувствуют конечность толщины слоя (рис. 4). Ситуация с точностью до наоборот отвечает описанной выше для одномерной потенциальной ямы: для тонких слоев начинают проявляться эффекты размерного квантования, непрерывный спектр "сменяется" дискретным набором уровней энергии. Правда, есть важное отличие от рассмотренного выше случая - в направлении роста структуры мы действительно имеем потенциальную яму. Но электроны и дырки могут свободно перемещаться в плоскости слоя, поэтому спектр в реальности является не дискретным, а непрерывным, и существует не набор уровней, а набор энергетических подзон. Каков характерный размер (в данном случае - толщина слоя), при котором начинают играть существенную роль квантовомеханические эффекты? Он должен быть сопоставим с длиной волны электрона (дырки), которая вблизи дна зоны проводимости (потолка валентной зоны) составляет десятки постоянных решетки, т.е толщина слоя должна быть в пределах одного-двух десятков нанометров. Подобные гетероструктуры с тонкими (несколько нанометров) слоями называются «квантовыми ямами».

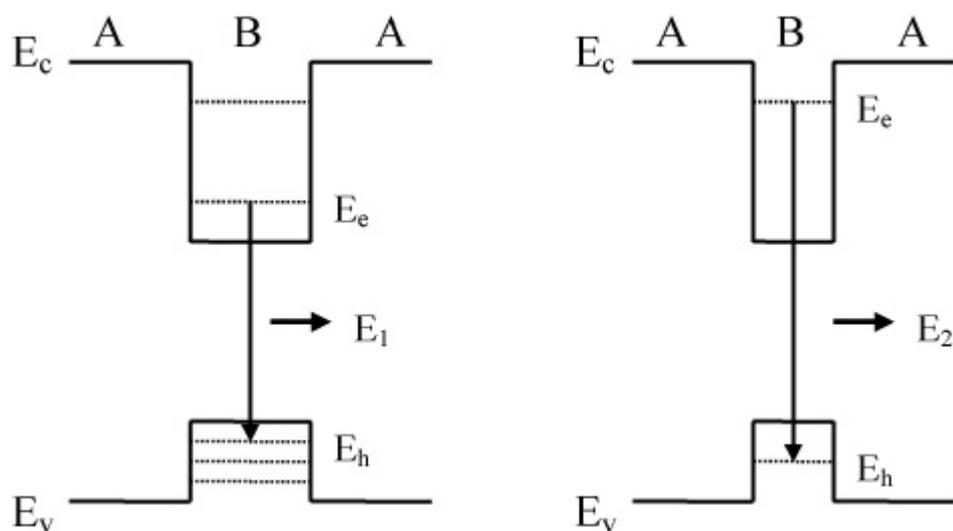


Рис. 4. Уменьшение толщины слоя материала В приводит к появлению уровней размерного квантования (E_c и E_v - края зоны проводимости и валентной зоны, соответственно, E_e и E_h - уровни размерного квантования для электронов и дырок). Энергетический спектр определяет спектр излучения структуры и, таким образом, энергия испускаемого при рекомбинации электрона и дырки фотона (E_1 и E_2 на схемах слева и справа) определяется уже не только ширинами запрещенных зон материалов А и В, но и шириной слоя (потенциальной ямы), поэтому $E_2 > E_1$. Примечание. Уровней энергии для дырки в более мелкой потенциальной яме больше, чем для электрона в более глубокой, так как эффективная масса у дырки больше, чем у электрона.

Существует естественный предел уменьшения толщины квантовой ямы: нельзя вырастить сплошной слой тоньше, чем один атомный слой. И, конечно, структуры с такими ультратонкими (десятые доли нанометра) слоями были выращены. На секунду остановитесь и попытайтесь представить - один-два-три слоя атомов в окружении другого материала. Возможно ли, чтобы этот тончайший слой как-то проявил себя? И вообще, возможно ли избежать того, чтобы через некоторое время слой просто не рассосался (атомы одного сорта не перемешались с атомами другого сорта)? На эти вопросы есть совершенно определенные ответы. 1. Как это ни удивительно, иногда следы присутствия такого слоя можно увидеть ... невооруженным глазом. Дело в том, что введение тончайшего слоя полупроводника В в матрицу полупроводника А радикально меняет спектр люминесценции структуры. В нем доминирует именно линия излучения квантовой ямы, намного превосходя по интенсивности все остальные линии - даже столь тонкая квантовая яма служит эффективной ловушкой для электронов и дырок. И, скажем, вместо зеленого света структура с ультратонкой квантовой ямой светит желтым или красным (в зависимости от толщины). 2. У автора в ящике стола лежат структуры с ультратонкими квантовыми ямами и квантовыми точками (о них речь впереди) CdTe в ZnTe, выращенными в новосибирском Институте физики полупроводников более десяти лет назад. За это время эти структуры десятки раз помещали в криостат, охлаждая до 5 К и снова отогревая. И с ними ничего не случилось! Они светят так же интенсивно и в том же диапазоне, как и десять лет назад.

Вернемся теперь к сверхрешеткам. Сверхрешетка представляет собой последовательность чередующихся слоев более узкозонного (яма) и более широкозонного (барьер) полупроводников, по сути, набор связанных квантовых ям. Появление дополнительного периода (толщина слоя ямы + толщина слоя барьера), превышающего период кристаллической решетки (отсюда термин «сверхрешетка»), приводит к изменению энергетического спектра структуры. Хорошая аналогия тут - образование естественных кристаллов из отдельных атомов. Из-за того, что волновые функции электронов перекрываются (электроны чувствуют друг друга), система уровней энергии атомов преобразуется в систему энергетических полос (зон), в пределах которых электроны могут свободно перемещаться по кристаллу. Так и в сверхрешетке уровни в отдельных квантовых ямах сливаются в энергетические минизоны, только, в отличие от естественного кристалла, ширинами минизон можно управлять, меняя толщины барьеров. С некоторой долей условности можно сказать, что сверхрешетка представляет собой одномерный кристалл, созданный человеком. Именно термин «созданный человеком кристалл» и употребил в своей работе Л.Эсаки.

Нельзя не сказать хотя бы нескольких слов о современных методиках получения полупроводниковых гетероструктур. Один из основных методов выращивания гетероструктур - молекулярно-пучковая эпитаксия. Из специальных ячеек, в которых содержатся исходные компоненты, происходит медленное напыление вещества на шайбу из полупроводникового материала (подложку). Скорости роста (слой с толщиной один микрон выращивается несколько часов) и другие условия таковы, что происходит послойный рост атомных слоев, что позволяет добиться высокого кристаллического совершенства получаемых структур. Естественно, процедура напыления протекает в высоком вакууме (в современных установках в отсутствие потоков вещества из ячеек можно получить вакуум не хуже нескольких единиц на 10^{-11} тор). Высокотехнологичные установки дают возможность, контролируемым образом изменяя условия (температуру подложки, давление потоков из источников с различными компонентами (в частности, открывая и закрывая заслонки у разных ячеек) и т.д.) получать сложные гетероструктуры с заданными свойствами.

Пропев дифирамбы могучей дорогостоящей современной технике (*слишком часто зарубежной, а не отечественной, увы*), обратим внимание на очень важную вещь. Мы говорили об изменении энергетического спектра структуры вследствие локализации электронов и дырок в квантовой яме. А будут ли эти квазичастицы, локализованные в столь тонком слое, вести себя также, как в объемном (трехмерном) полупроводнике: фактически для движения им остаются только два измерения? Разве это не должно соответствующим образом изменить свойств электронной подсистемы

кристалла? Понижение размерности действительно имеет место быть. В случае квантовых ям поэтому говорят о двумерном электронном газе. И, соответственно, квантовые ямы можно назвать квазидвумерными структурами. Нет никакой возможности отразить всю совокупность явлений, связанных с подобным изменением эффективной размерности пространства. Можно только сказать, что за открытие и исследование квантового эффекта Холла (целочисленного и дробного, когда квазичастицы ведут себя так, будто имеют дробный заряд) при изучении свойств двумерного электронного газа присуждено две Нобелевские премии.

Проиллюстрировать физику дела можно на одном примере. В простейшем атоме, атоме водорода, где один электрон взаимодействует с одним протоном, можно получить аналитическое решение задачи на определение энергетического спектра. В полупроводниках при низких температурах существуют водородоподобные квазиатомы - экситоны. Экситон представляет собой связанное состояние электрона и дырки, возникающее в результате кулоновского взаимодействия. Еще более точной будет аналогия со связанным состоянием электрона и позитрона, позитронием, поскольку экситон нестабилен, т.е. имеет конечное время жизни. Образующие экситон электрон и дырка могут рекомбинировать (аннигилировать), испустив фотон. Но электрон и дырка взаимодействуют не в вакууме, а в среде с диэлектрической проницаемостью порядка 10, и, кроме того, эффективная масса этих квазичастиц меньше массы свободного электрона (грубо говоря, чтобы корректно описать поведение электрона, живущего в кристаллической решетке, можно считать его частицей с массой, отличной от массы свободного электрона). Поэтому энергия связи экситона в полупроводниках примерно на три порядка меньше, чем энергия связи электрона и протона в атоме водорода. Так что экситоны в объемных полупроводниках не доживают до комнатной температуры (даже если в институте не топят), с ростом температуры за счет взаимодействия с колебаниями решетки происходит диссоциация экситона - распад на электрон и дырку.

Что же будет происходить с экситоном при понижении размерности? Решая уравнение Шредингера в чисто двумерном случае, мы получим ответ: энергия связи экситона должна увеличиться в четыре раза. Действительно, энергия связи экситона в квантовых ямах возрастает (экситоны в квантовых ямах могут существовать и при комнатной температуре), но не столь сильно. Необходимо учесть, что чисто двумерная ситуация - идеализация. В реальности высота потенциального барьера всегда конечна, как и ширина квантовой ямы (толщина слоя), поэтому экситон никогда не становится чисто двумерным. Энергия связи экситона имеет максимум при некоторой промежуточной ширине квантовой ямы. Дело в том, что по мере уменьшения толщины ямы из-за конечности

высоты барьера уровень энергии выталкивается вверх и экситон становится все более трехмерным, можно сказать, что эффективная размерность системы повышается.

После квазидвумерных структур должны по идее идти квазиодномерные и квазинульмерные. Они существуют: «квантовые проволоки» (иногда их называют «квантовыми нитями») - квазиодномерные структуры. Носители заряда в квантовой проволоке локализованы в двух направлениях и могут свободно перемещаться в одном, вдоль проволоки. И, наконец, квазинульмерные структуры - квантовые точки. На первых порах наряду с неустоявшимся еще термином квантовые точки бытовал термин квантовые ящики, по-видимому, более наглядный. По существу, это трехмерные потенциальные ямы, т.е. квазичастицы локализованы во всех трех направлениях. Естественно, характерные размеры такого объекта, называй ли его точкой (с точки зрения человека) или ящиком (с точки зрения электрона), - те же самые несколько нанометров. Полная - во всех направлениях - локализация приводит к тому, что энергетический спектр подобной структуры по-настоящему дискретен. Именно по этой причине квантовые точки иногда называют искусственными атомами - эти изготовленные человеком объекты нанометровых размеров имеют квазиатомный (дискретный) энергетический спектр.

У вас, видимо, возникает законный вопрос: вырастить квантовую яму просто, ввели тонкий слой одного полупроводника в матрицу другого, и пожалуйста, однако как же получить квантовые проволоки и квантовые точки? Можно, конечно вырезать полосы (квантовые нити) или квантовые точки из выращенных плоских слоев с помощью литографии, иногда так и поступают. Однако это не самый удобный и легкий путь. Как говорится в одном рекламном ролике, «есть способ лучше» - спонтанное формирование квантовых точек в процессе роста. Помните, как важно было на первом этапе найти идеальную гетеропару, материалы с близкими постоянными решетки? Так вот, с развитием технологии оказалось, что напряжения в структуре могут играть и положительную роль. При росте ультратонких напряженных слоев иногда оказывается термодинамически выгодным не двумерный (послойный) рост, а трехмерный рост - распад сплошного слоя на массив отдельных островков-включений (рис. 5). Так происходит, например, в наиболее хорошо исследованной системе InAs/GaAs, где постоянные решетки соединений InAs и GaAs различаются на 7 %. В этой системе самопроизвольно формируются квантовые точки в форме ... пирамидок с квадратным основанием (сторона квадрата порядка 12 нм) и высотой до 6 нм. Но возможны варианты - в системе CdSe/ZnSe (те же 7 % разницы постоянных решетки) квантовые точки образуются в форме плоских блинчиков.

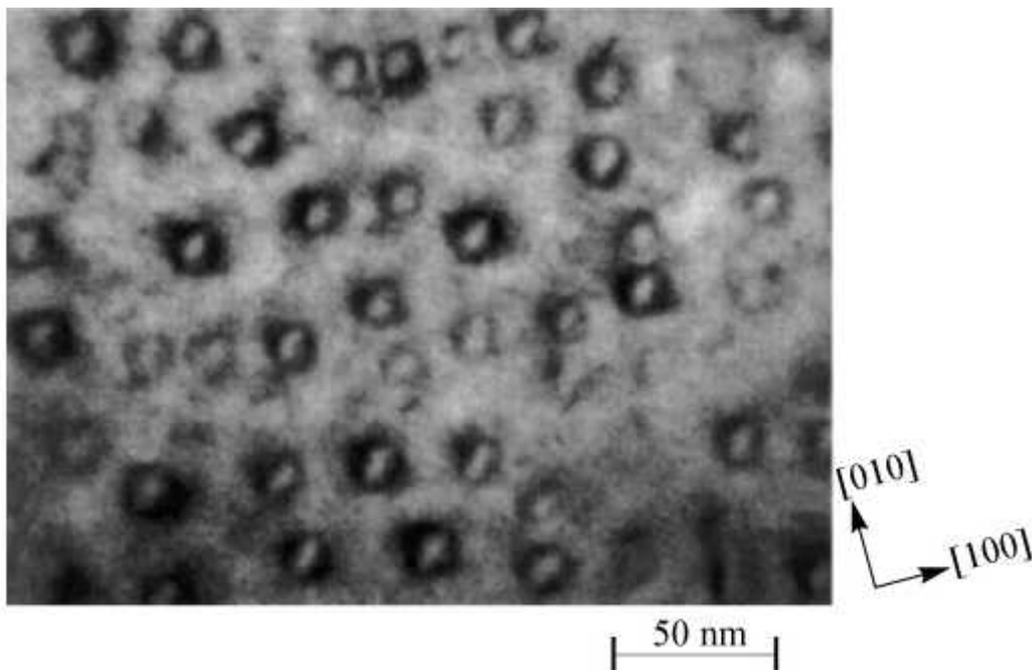


Рис. 5. Изображение квантовых точек InAs в матрице GaAs (вид сверху), полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Важно отметить, что формирование квантовых точек происходит без образования дислокаций несоответствия (говорят о системе когерентно напряженных трехмерных островков).

Пожалуй, наше путешествие подходит к логическому концу. Как нельзя вычерпать кружкой море, так и невозможно дать развернутую картину происходящего в физике низкоразмерных структур и нарисовать перспективы практического применения гетероструктур и наноструктур. Ограничимся одним примером. С точки зрения практического применения история развития полупроводниковых лазеров - это в значительной степени история борьбы за снижение их порогового тока, при котором начинается лазерная генерация. Действительно, большие токи - это большие рассеиваемые мощности, соответственно, перегрев и ускоренная деградация полупроводниковой структуры. Малые пороговые токи - это долгоживущие миниатюрные лазерные устройства. На рис. 6 показана временная эволюция пороговой плотности тока полупроводниковых лазеров. Видно, сколь велика заслуга полупроводниковых гетероструктур (в особенности низкоразмерных структур) - пороговую плотность тока удалось снизить более чем на три порядка.

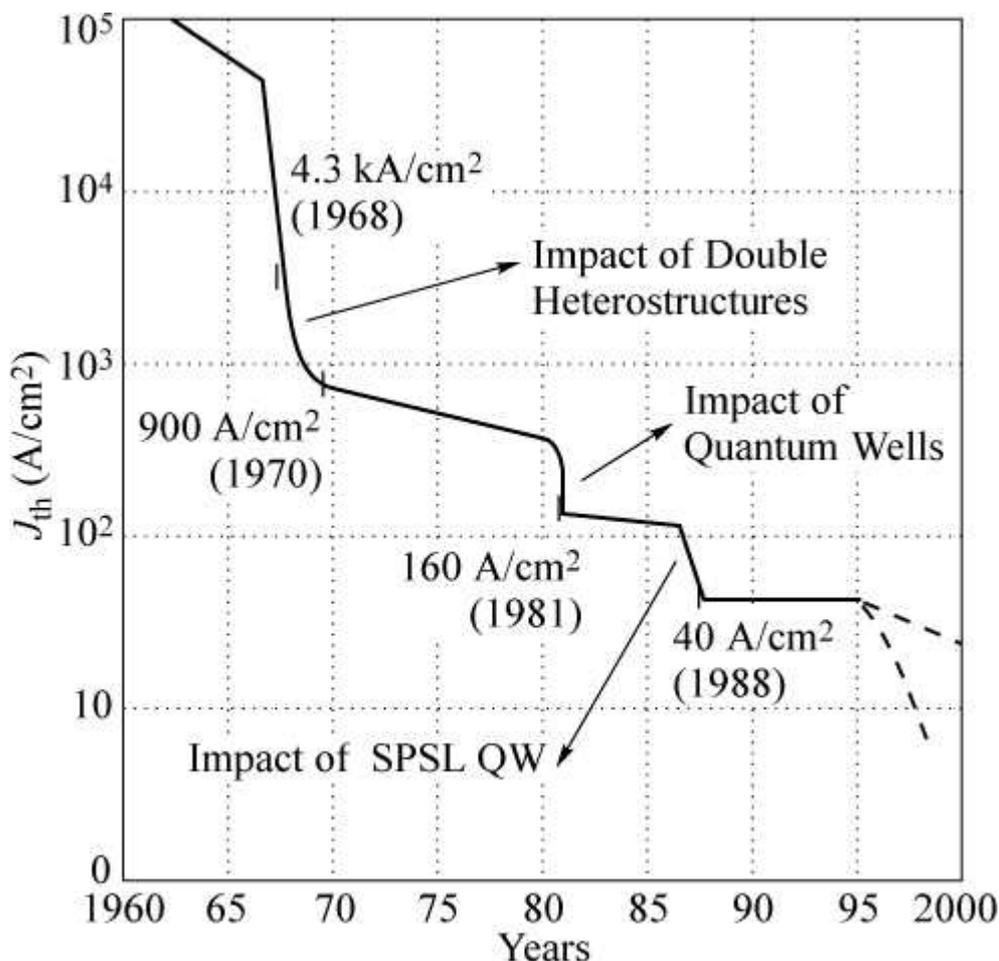


Рис. 6. Эволюция порогового тока полупроводниковых лазеров. Стрелками показаны важные этапы, слева направо: влияние двойных гетероструктур, влияние квантовых ям, влияние гетероструктур, содержащих квантовую яму "в окружении" короткопериодных сверхрешеток (рекордный для своего времени результат 40 А/см² был получен в Физико-техническом институте им.А.Ф.Иоффе). Данный график отражает ситуацию на момент середины 1990-х годов, в настоящее время лазеры на квантовых точках имеют пороговые плотности тока порядка 15 А/см².

Подводя итог. Если классические гетероструктуры открыли новые технологические горизонты, то использование низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур дает исследователям, технологам и инженерам практически неограниченную свободу рук. Можно сказать, что Нобелевский лауреат Ж.И.Алферов подарил человечеству своего рода конструктор. Поскольку в наноструктурах существенную роль играют квантовомеханические эффекты, можно даже сказать квантовый конструктор. Путем подбора параметров гетероструктуры (материалы, толщины (см. рис. 4) и последовательность расположения слоев etc.) исследователи теперь в состоянии получать структуры с требуемыми свойствами. Например, просто меняя номинальную толщину слоя CdTe в матрице ZnTe с 0.3 до 1.2 нм, мы изменяем длину волны излучения (при температуре 5 К) с 530 до 620 нм, т.е. переходим из зелено-желтой области видимого спектра в красную.

Наверно, стоит сказать несколько слов и о том, как обстоят дела с

исследованием низкоразмерных структур в России в настоящее время. Сложные методики роста, сложные экспериментальные методики - все это требует значительных финансовых затрат. Современная установка для молекулярно-лучевой эпитаксии, к примеру, стоит порядка миллиона долларов. Тем не менее, пока уровень российских научных работ в этой области остается достаточно высоким. И Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе, директором которого в настоящее время является Ж.И.Алферов, по праву можно назвать ведущим в России исследовательским центром в области полупроводниковых наноструктур. Высокий творческий потенциал, умелое использование советского технологического задела и широкая международная кооперация позволяют исследователям из питерского Физтеха быть на переднем крае физики

Фотонные кристаллы. Все большее число специалистов видят в фотонных кристаллах будущее оптической связи, а некоторые — и вычислительной техники вообще. Если использовать для передачи сигналов не электрический ток, а свет, то есть надежда достичь тактовых частот порядка 1000 ГГц.

В 1998 году западные информационные агентства сообщили, что в лаборатории Sandia National Laboratories, принадлежащей американскому Департаменту энергетики, разработана новая светоизгибающая (light bending) технология, которая в недалёком будущем найдёт применение в телекоммуникационных сетях. Микроскопическая трёхмерная структура (получившая название фотонной решётки) создана на основе кремния и позволяет передавать когерентный свет в оптическом диапазоне длин волн с минимальными потерями. Эффективность передачи составляет 95 процентов, что значительно превосходит показатель стандартных светопередающих сред (около 30 процентов), используемых в настоящее время. При этом можно направлять лучи по сложной траектории, содержащей „изгибы“, практически под прямым углом в заданную точку. Решётка представляет собой пачку тонких кремниевых двухмерных дифракционных решёток, каждый слой которой повернут на 90 градусов относительно соседнего. Для создания работающей фотонной решётки достаточно десяти таких слоёв.

При взгляде через микроскоп фотонная решётка похожа на подготовленный костёр, сложенный колодцем. Она обладает уникальной способностью изгибать траекторию световых волн определённой частоты практически в любом направлении и практически без потерь. Это изобретение может привести к существенному прогрессу в области телекоммуникаций и оптических компьютеров.

Решётка из перекрёстных диэлектрических полосок является идеально отражающей средой для световых волн определённого диапазона частот, который называется запрещённой зоной. Световые волны этого диапазона

не могут распространяться внутри решётки, а при наличии внутри неё полостей или нерегулярностей оказываются захваченными такими ловушками. Создавая цепочки нерегулярностей, можно формировать световедущие каналы, при помощи которых открывается возможность изменять направление световых волн даже на острые углы. Потери на изгиб в таких устройствах практически отсутствуют, а радиус изгиба в пятьдесят раз меньше, чем в использующихся сейчас устройствах интегральной оптики.

Идея фотонной решётки была предложена ещё в 1987 году Эли Яблоновичем, работающим сейчас профессором в Калифорнийском университете. Первый фотонный кристалл размером с бейсбольный мяч был создан в 1990 году, он управлял микроволновым излучением. Тогда же был создан кристалл размером уже с шарик для пинг-понга (в университете штата Айова), он тоже работал в микроволновом диапазоне. Первые кристаллы-решётки собирались вручную из обычных металлических иголок. В том же направлении работала и группа Иоаннопулоса в Массачусетском технологическом институте.

Главное достижение лаборатории Sandia — технологический прорыв в область нанометровых трёхмерных структур. Об открытии было объявлено 16 июля 1998 года, оно запатентовано, есть уже предложения от крупных промышленников, готовых организовать коммерческое производство. Современные решётки, созданные там Шоном Лин и Джимом Флеммингом, успешно работают в инфракрасном диапазоне (длины волн около десяти микрон). Мало того, исследователи не останавливаются на достигнутом и изготавливают решётку для полуторамикронных длин волн — именно в этом диапазоне сегодня передаётся информация по волоконно-оптическим кабелям. «У меня нет сомнений в том, что группа Лина добьётся успеха ещё в этом году», — говорит профессор Вильнев из Массачусетского технологического института.

Такая уверенность основана на том, что в лаборатории Sandia очень развита технология изготовления микроструктур из кремния, похожая на ту, что обычно используют при производстве компьютерных чипов. Многослойная кремниевая вафля покрывается двуокисью кремния, затем в нём процарапываются канавки, которые заполняются полисиликоном. Слой полируется, и на него накладывается следующий с полосками в перпендикулярном первом направлении. После построения десятка или более слоёв двуокись кремния вытравляется при помощи кислоты, и остаётся объёмная решётка из полисиликоновых полосок толщиной 1,2 микрона и высотой 1,5 микрона с расстоянием между ними в 4,8 микрон. На шестидюймовом чипе можно разместить десяток тысяч таких решёток.

Подобное достижение означает революционный прорыв в создании оптического компьютера, мечты о котором давно будоражат умы изобретателей. Одним из главных препятствий на пути его создания была невозможность изгибать траектории лучей света на большие углы на малых расстояниях. Ведь если заменить провода в современных чипах световодами, то в устройстве размером со спичечный коробок световоды придется изгибать миллионы раз.

Первое применение фотонного кристалла — создание световедущих каналов. Современные световедущие каналы на основе оптического волокна не могут иметь крутых изгибов из-за недопустимого увеличения потерь, вызванного нарушением полного внутреннего отражения в них. Световедущие каналы в фотонном кристалле основаны на другом принципе: практически идеальное отражение света под любым углом от стенок световедущего канала обеспечивается наличием запрещённой зоны для световой волны передаваемой частоты, препятствующей проникновению света вглубь фотонного кристалла.

Второе применение — это спектральное разделение каналов. Во многих случаях по оптическому волокну идёт не один, а несколько световых сигналов. Их бывает нужно рассортировать — направить каждый по отдельному пути. Например — оптический телефонный кабель, по которому идёт одновременно несколько разговоров на разных длинах волн. Фотонный кристалл — идеальное средство для высечения из потока нужной длины волны и направления её туда, куда требуется.

Третье — кросс для световых потоков. Такое устройство, предохраняющее от взаимного воздействия световых каналов при их физическом пересечении, совершенно необходимо при создании светового компьютера и световых компьютерных чипов.

Специалисты по волоконной оптике сразу заинтересовались фотонными кристаллами, разглядев самые разные перспективы их использования для увеличения пропускной способности сетей. Чтобы увеличить объём передаваемых по волоконным световодам данных, надо создавать как можно более короткие оптические импульсы. Это определяется временем срабатывания эмиссионных диодов. Вторая проблема — волоконные световоды прозрачны в малом диапазоне длин волн. Третья проблема — на выходе информационных каналов требуются узкочастотные оптические фильтры и высокоскоростные оптические переключатели — своеобразные интегральные оптические схемы. Для них нужно создавать миниатюрные плоскостные волноводы.

Фотонные кристаллы могут помочь решить все эти проблемы. С их помощью можно сузить диапазон длин волн излучения в полупроводниковых лазерах и эмиссионных диодах или создать

оптические фильтры с высокой селективностью. Главный недостаток существующих эмиссионных диодов и полупроводниковых лазеров в том, что они испускают фотоны в большой телесный угол и в широком частотном диапазоне. На основе фотонных кристаллов можно создать зеркало, которое будет отражать определённую волну света для любого выбранного угла и направления.

Такие трёхмерные зеркала были созданы в 1994 году в лаборатории Эймса (США) для СВЧ-волн. Для более коротких длин волн их разработали специалисты из Голландии и США. Эти структуры представляют собой специально уложенные кремниевые полоски — для СВЧ-волн — или специальным образом ориентированные крошечные (меньше микрона) кварцевые сфeры в некотором коллоидном веществе.

Ещё одна перспективная технология в волоконной оптике — скоростные солитонные линии связи, которые отличаются от обычных высокой помехоустойчивостью и низким уровнем шумов. Солитоны — это устойчивые уединённые гребни волн, которые распространяются в среде как частицы. При взаимодействии друг с другом или с другими возмущениями они не разрушаются, а расходятся, сохраняя свою структуру неизменной. Разработка таких терабитных линий связи финансируется министерством телекоммуникаций Японии в размере около 4 млрд. долларов в год. Программа была начата в 1996 году и была рассчитана на десять лет. В ней принимают участие все крупнейшие японские высокотехнологичные компании, планирующие получить готовые к эксплуатации солитонные линии протяжённостью до 10 тысяч км. К сожалению, о российских разработках в этой области нам ничего неизвестно.

Глава 2. Гигантское магнетосопротивление. Квантовый эффект Холла

Шведская королевская академия наук в Стокгольме назвала имена лауреатов Нобелевской премии 2007 года в области физики. Ими стали француз Альбер Фер и немец Петер Грюнберг. Ученые, согласно сообщению Нобелевского комитета, открыли "квантомеханический эффект, наблюдаемый в тонких пленках, составленных из меняющихся ферромагнитных слоев". Благодаря открытию емкость запоминающих устройств - жестких дисков компьютеров - увеличивается, тогда как их физические размеры значительно сокращаются. Открытие нобелевских лауреатов широко используется в производстве компьютерных винчестеров. Это открытие может рассматриваться и как первое практическое воплощение нанотехнологий.

Петер Андреас Грюнберг (Peter Andreas Grünberg) — немецкий физик, специализирующийся в области физики твёрдого тела. Родился 18 мая

1939 года в г. Пльзене (нынешняя Чехия). Самым известным его открытием является эффект гигантского магнетосопротивления, за которое он был удостоен Нобелевской премии в 2007 году (совместно с Альбертом Фером)

После переселения в Германию, Грюнберг проживал со своими родителями в городе Лаутербах в федеральной земле Гессен. В 1959 году он сдал экзамены на допуск в университет. Начиная с 1962 году он обучался в университете города Франкфурт-на-Майне и в техническом университете Дармштадта. С 1966 по 1969 год Грюнберг проходил аспирантуру у профессора Штефана Гюфнера по теме «Спектроскопические исследования некоторых редкоземельных гранатов». После защиты диссертации в 1969 году получил степень доктора философии. Затем он провёл три года в Карлтонском университете в Оттаве. С 1972 года работал научным сотрудником в исследовательском центре Юлиха. Защитил докторскую диссертацию в университете Кёльна, где он с 1984 года работал приват-доцентом, а с 1992 года профессором. С момента выхода на пенсию в 2004 году Грюнберг работает в качестве приглашённого учёного в исследовательском центре Юлиха в институте исследования твёрдого тела, отделении электронных свойств.

Грюнберг был одним из первых, кто занялся исследованием магнитных свойств тонких плёнок. Эта область исследований изучает спиновые свойства материалов и называется спинтроникой. Результаты исследований позволили создать новые, уменьшенные электронные устройства. В 1986 году Грюнберг открыл анти-ферромагнитную взаимосвязь в слоях железа и хрома. В конце 1987 года Грюнберг открыл, почти одновременно с Альбертом Фером, эффект гигантского магнетосопротивления, при помощи которого в конце 1990-х годов удалось резко увеличить ёмкость накопителей на жёстких магнитных дисках. Принцип действия большинства головок записи/считывания информации по состоянию на 2007 год основывался на этом эффекте. Плата за лицензии на использование патентов (начиная с патента DE 3.820.475 «сенсоры магнитного поля с тонким ферромагнитным слоем» дата заявки 16.06.1988) поступает на счёт института в Юлихе и составляет двузначные миллионные суммы.

Альбер Фер (Albert Fert) — французский учёный-физик. Родился 7 марта 1938 года в г. Каркассон. В 1962 году Фер окончил Высшую нормальную школу в Париже, а в 1963 году он получил степень магистра в Сорбонне. В 1970 году стал доктором в университете Париж-Юг, в котором он и работал научным сотрудником. Первоначально Фер и Грюнберг работали независимо друг от друга, но с 1988 года стали проводить исследования вместе и в 1988 году обнаружили в слое железа и хрома эффект гигантского магнетосопротивления, за которое Фер и Грюнберг были удостоены Нобелевской премии в 2007 года.[48]

Начать рассказ о гигантском магнетосопротивлении стоит с того, откуда

берется обычное электрическое сопротивление металлов. Самый удивительный факт про него состоит в том, что его нельзя понять без квантовой механики.

Электрический ток в металле — это поток свободных (не связанных с конкретными атомами) электронов. Возникает он потому, что кусок металла находится под напряжением — то есть внутри него возникают электрические силы, которые и приводят электроны в движение. В свою очередь, сопротивление проводника возникает из-за того, что в своем движении электроны натываются на препятствия, постоянно сбиваясь с того курса, на который их направляют электрические силы.

Не стоит представлять себе этот процесс протекания тока так, словно электроны разгоняются, сталкиваются с атомами, останавливаются и снова разгоняются. На самом деле электроны внутри металла движутся всегда, даже без внешнего электрического поля и при нулевой температуре, причем с весьма большой скоростью порядка 10^6 м/с. Подобное неустранимое движение электронного газа внутри металла возникает из-за принципа Паули — важнейшего квантового закона, запрещающего двум или более электронам занимать одинаковое квантовое состояние. В данном случае это означает, что электроны не могут иметь слишком близкие значения энергии, а значит, они не могут все остановиться. В результате электроны в металле обладают всевозможными энергиями — от нуля и до энергии Ферми.

«Препятствия», на которые натываются электроны, — это вовсе не атомы. На самом деле, атомы для электронов проводимости вообще прозрачны — если, конечно, они расположены в виде строгой периодической решетки (это — проявление волновой природы электронов, то есть чисто квантовое явление). Натываются же электроны на неоднородности, нарушения строгой периодичности — например, на дефекты кристалла, на примесные атомы или просто на тепловые колебания.

Если приложить напряжение, то на быстрое беспорядочное движение электронов наложится медленное смещение под действием внешних электрических сил. Этот медленный дрейф и есть электрический ток. Тут есть важный момент: участвовать в этом движении могут далеко не все электроны, а только очень небольшая их часть — лишь те, которые обладают энергией, близкой к максимальной (то есть к энергии Ферми). Если таких электронов много, то ток течет большой, а значит, сопротивление маленькое. Если таких электронов мало, то ток получается малым, то есть материал имеет большое сопротивление.

У электрона есть еще одна квантовая характеристика — спин $s=1/2$, с двумя возможными проекциями на выделенное направление $\pm 1/2$. Если выбрать какое-то направление, то у электрона спин может быть ориентирован по этому направлению и против него — условно говоря, вверх и вниз.

В большинстве веществ ориентация спина никак не сказывается на электрическом токе — потому-то в электротехнике про спин электрона вообще не вспоминают. Однако для явления гигантского магнетосопротивления именно спин играет ключевую роль. Само это открытие гигантского магнетосопротивления, собственно, стало моментом рождения новой области электроники — спинтроники, в которой спин электрона такая же важная характеристика, как и его заряд.

Отличительной особенностью спина является его связь с магнитным полем. Спиновой (собственный) механический момент порождает собственный магнитный момент электрона равный магнетону Бора $0,927 \cdot 10^{-23}$ Дж/Тл. (Данное значение в два раза превышает предсказанное теорией Бора и получило объяснение лишь в релятивистской теории Дирака). Магнетизм ферромагнетиков обусловлен именно спиновыми магнитными моментами электронов, орбитальное движение электронов в них заморожено. В соответствии с первым правилом Хунда спины электронов в ионах переходных металлов (и в частности ферромагнетиков кобальта, никеля и железа) не скомпенсированы и ионы приобретают большой спиновой, а следовательно и магнитный момент. При этом спины всех ионов выстраиваются в одинаковом направлении.

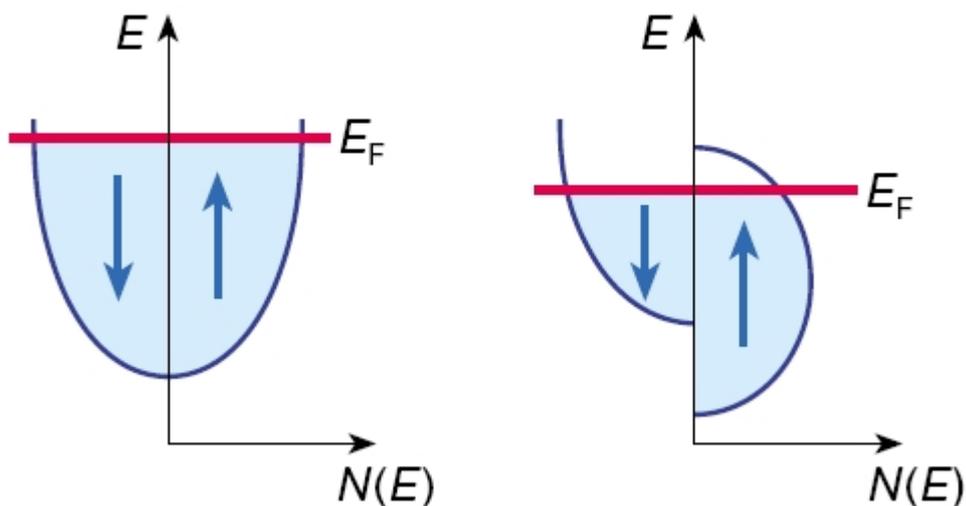


Рис. 1. Концентрация 3d-электронов проводимости в зависимости от энергии. Без магнитного поля концентрация электронов со спином вверх и вниз одинаковая. В присутствии магнитного поля (то есть внутри ферромагнетика) энергии электронов со спином по и против поля сдвигаются. В результате концентрация электронов вблизи энергии Ферми (E_F) разная. (Изображение из статьи С. А. Никитина Гигантское магнетосопротивление из Соросовского образовательного журнала)

Теперь попытаемся представить, как ведут себя электроны проводимости, находясь в ферромагнетике. Магнитное поле внутри металла влияет на электроны, причем влияет по-разному для спинов по полю и против поля.

Это немного сдвигает их энергии, и в результате количество электронов вблизи энергии Ферми со спином вверх и вниз получается разное. Как следствие, электрический ток в ферромагнитном металле состоит из двух разных, но тщательно перемешанных потоков — потоков электронов со спином по направлению намагниченности и против него. Эти два типа электронов испытывают со стороны металла разное сопротивление — те, которые ориентированы против поля, двигаются более свободно, чем те, которые ориентированы наоборот. (Напомним, что вследствие отрицательного заряда электрона его спиновой механический и магнитный моменты направлены в противоположные стороны).

Подчеркнем, что в обычной медной проволоке такого разделения нет — эта картина специфична именно для ферромагнетиков, например для намагниченного куска железа. Она была подтверждена экспериментально не так давно, в 1968 году. Среди авторов работы был и Альберт Фер — один из лауреатов Нобелевской премии 2007 года. И хотя от той статьи и до работ по гигантскому магнетосопротивлению должно было пройти еще 20 лет, но общее понимание электрических явлений в ферромагнетиках складывалось именно тогда.

Итак, «внутренний мир» ферромагнетика оказывается очень богатым, но пока не видно способа им воспользоваться для манипуляции сопротивлением образца. Ведь если металл ферромагнитный, то он таким остается и при воздействии внешних полей, разве только у него может измениться направление намагниченности. Но тут пришли на помощь новые искусственные материалы, не существующие в природе — сверхрешетки. Как оказалось, именно в них можно управлять не просто величиной намагниченности, а характером магнитной упорядоченности, и уже через него электрическим сопротивлением.

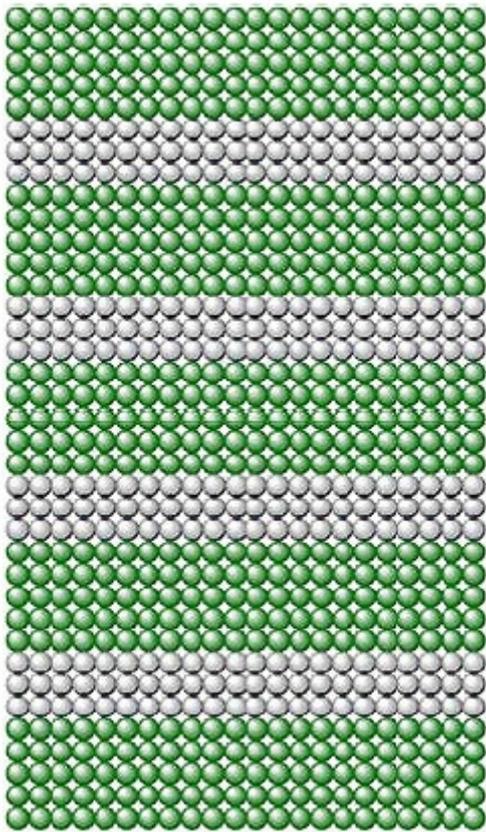


Рис. 2. Сверхрешетка — это чередующиеся слои толщиной в несколько атомов различных материалов с согласованной кристаллической структурой

Сверхрешетка - это слоеный кристалл, состоящий из строго чередующихся слоев то одного, то другого материала толщиной всего в несколько атомов. Приставка «сверх» отражает здесь наличие периодической структуры еще большего размера, чем период кристаллической решетки (см. рис. 2).

Изготовление таких слоев — технологически непростая задача. Их выращивают в глубоком вакууме, напыляя на подложке слой за слоем нужное вещество. Оба типа вещества, а также сама подложка, должны обладать согласованной по типу и ориентации кристаллической решеткой и не иметь дефектов и динамических напряжений на границах слоев, иначе это самым негативным образом скажется на протекании через слойку электрического тока. Кроме этого, надо следить, чтобы атомарные слои напылялись ровно и чтобы слои разных веществ ровно накрывали друг друга, не перемешиваясь. Контроль состава осуществляется масс-спектрометрическими методами, а контроль качества поверхности — рентгеноструктурными. Наконец, требуется еще и контролировать магнитные свойства вырастающих слоев, для чего применяется эффект

рассеяния света спиновыми волнами.

Как только научились изготавливать разные слойки, начались интенсивные эксперименты с разными комбинациями материалов, в том числе и с чередующимися слоями ферромагнетика и немагнитного металла. В ходе исследований выяснилась, что если правильно подобрать материал для немагнитных слоев и его толщину, то магнитные слои приобретут «противоестественную» для ферромагнетика тенденцию чередовать ориентацию намагниченности (см. рис. 3 слева). В слойке железо–хром обнаружил это Петер Грюнберг (второй нобелевский лауреат 2007 года) вместе со своими сотрудниками в 1986 году. Интересно, что их статья с этими результатами цитируется даже больше, чем работа 1988 года об обнаружении гигантского магнетосопротивления.

Кстати, не стоит думать, что все такие открытия делаются автоматически. У Грюнберга был шанс «проглядеть» это замечательное свойство слоев железа–хрома. Его группа изучала также и слойки железо–золото, и вот в них ничего подобного найдено не было. Если бы исследование только ими и ограничилось, открытие эффекта, возможно, задержалось бы на некоторое время.

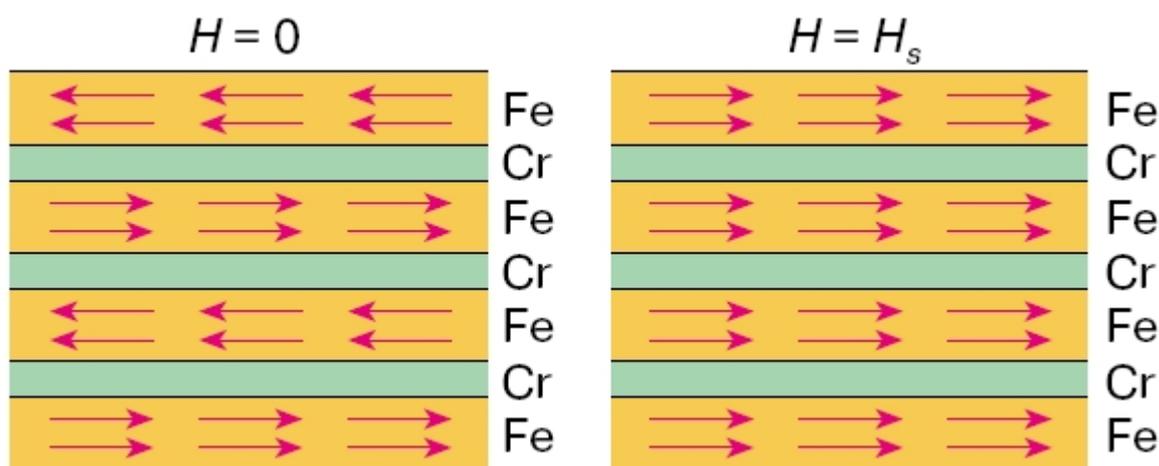


Рис. 3. Если слои ферромагнетика (железа, Fe) чередуются с тонкими слоями немагнитного металла (хрома, Cr) определенной толщины, то слои ферромагнетика будут чередовать направление намагниченности (слева). Однако если эту структуру поместить в достаточно сильное внешнее поле, то намагниченность всех слоев развернется в одну сторону (справа). Изображение из статьи С. А. Никитина Гигантское магнетосопротивление из Соросовского образовательного журнала

Последнее, что здесь нужно объяснить, — как такая слойка перестраивается под действием внешнего магнитного поля. Магнитное поле, как известно, способно перемагнитить «неправильно» ориентированный ферромагнетик. Поэтому если такую слойку поместить в достаточно сильное магнитное поле,

то оно заставит все слои железа развернуться в одном направлении, как показано на рис. 3 справа. Если же поле убрать, то чередование слоев вновь восстановится. Так у экспериментаторов появилась возможность легко изменять тип магнитной упорядоченности.

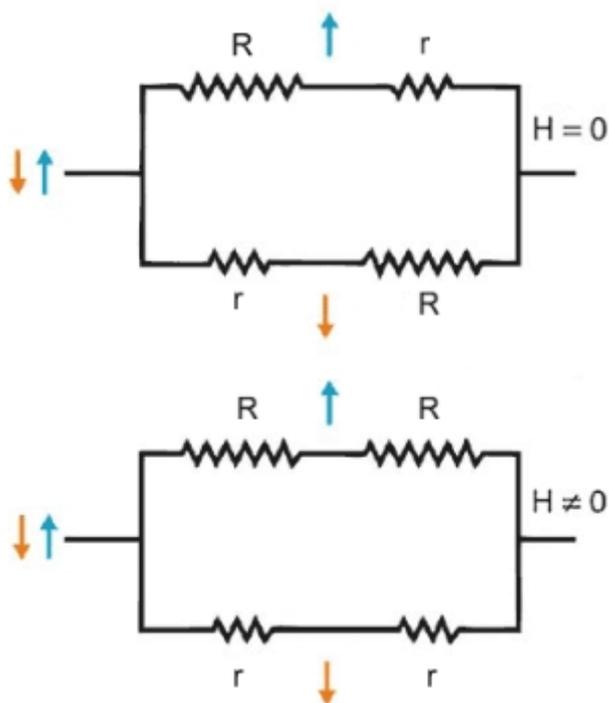


Рис. 4. Простая модель для расчета сопротивления в случае чередующегося (вверху) и одинакового (внизу) направления намагниченности слоев железа. Синяя и оранжевая стрелки показывают сопротивления, испытываемые электронами со спином вверх и вниз

Когда все ключевые аспекты расписаны, остается разобраться с тем, что происходит с электрическим током, который течет сквозь такую слойку поперек слоев.

В отсутствие внешнего магнитного поля слои железа намагничены в чередующемся направлении. Двигаясь поперек слойки, электроны со спином вверх чувствуют большое сопротивление внутри слоев с магнитным полем вверх, но слабое сопротивление внутри слоев с магнитным полем вниз. Для электронов со спином вниз всё в точности наоборот. Поскольку и тех, и других слоев одинаковое число, то оба сорта электронов оказываются в равноправной ситуации.

Если же приложить внешнее поле и выровнять намагниченность всех слоев,

то электроны двух типов окажутся в разных условиях. Электроны, ориентированные по полю, везде, во всех слоях, испытывают большое сопротивление, то есть их вклад в ток уменьшится. В то же время электроны, ориентированные в противоположном направлении, испытывают везде маленькое сопротивление. Иными словами, для таких электронов слойка выглядит как короткое замыкание, и переносимый ими ток заметно возрастает. Во сколько именно раз уменьшится ток со спином по полю и увеличится ток со спином против поля — зависит от свойств вещества, но в любом случае увеличение пересилит уменьшение тока, и в результате суммарное сопротивление уменьшается.

Эту задачку нетрудно сосчитать и количественно — она будет по силам даже школьнику, умеющему «складывать сопротивления». Надо только представить себе, что два сорта электронов работают как два параллельных участка электрической цепи (несмотря на то, что текут они сквозь одну и ту же слойку). Все наводящие соображения и обозначения показаны на рис. 4.

Первоначальные эксперименты Фера показали уменьшение сопротивления образца почти в два раза. Правда, такой результат был достигнут лишь с использованием сильных магнитных полей и при очень низкой температуре, всего 4,2 градуса выше абсолютного нуля. В экспериментах Грюнберга при комнатной температуре изменение сопротивления было гораздо скромнее, всего полтора процента — и тем удивительнее, что будущий Нобелевский лауреат не только разглядел в этом принципиально новый эффект, но и запатентовал его. Несколько лет исследований позволили добиться уменьшения сопротивления в два раза уже при комнатной температуре и гораздо меньших магнитных полях.

На гигантское магнетосопротивление полезно взглянуть еще и вот с какой точки зрения. Само явление формулируется чрезвычайно просто и выглядит очень естественно: электрический ток и магнитное поле — это классическая физика XIX века. Однако реальные микроскопические причины, приводящие к такому интересному эффекту, очень непросты и многократно опираются на квантовую механику. Можно даже отметить, что в этом явлении проявляются все три принципиальных отличия квантовой механики от классической — волновая природа, тождественность и спин частиц.

Напрашивается также и параллель еще с одним электромагнитным явлением со схожей судьбой — эффектом Холла. Этот эффект тоже возникает при протекании тока в магнитном поле, он тоже был открыт в XIX веке, и с приходом квантовой механики в нём тоже открыт целый пласт новых эффектов. Только, в отличие от магнетосопротивления, эффект Холла привел уже к двум Нобелевским премиям по физике — за 1985-й и за 1998 год.

Впрочем, у магнетосопротивления есть реальный шанс поквитаться. На очереди стоит колоссальное магнетосопротивление — явление совсем иного

уровня сложности, детальное понимание которого пока что ускользает от исследователей.

В объявлении Нобелевского комитета премии по физике за 2007 год очень много внимания уделяется тому, что использование эффекта гигантского магнетосопротивления привело к резкому увеличению плотности записи на жестких дисках. Связь очень простая — слойка с гигантским магнетосопротивлением явилась чрезвычайно компактным, быстрым, чувствительным и, наконец, очень простым датчиком магнитных полей. Будучи расположенной над быстро вращающейся пластиной жесткого диска, такая слойка послушно отслеживает, магнитные поля пролетающих под ней битов и сразу же переводит их в электрический ток.

Однако несколько удручает то, что многочисленные СМИ, ужимая все сообщение в одну фразу, полностью выкидывают саму суть открытия, оставляя лишь его «потребительскую» сторону. Из многочисленных заголовков следует, что премия дана за нанотехнологии или даже за уменьшение размеров жестких дисков. На самом деле, в своих статьях об открытии явления гигантского магнетосопротивления, будущие Нобелевские лауреаты писали о практических приложениях лишь в самых общих словах. Они ни в коей мере не были нацелены именно на какое-либо конкретное практическое применение — они изучали новый магнитный эффект. И премия была дана именно за научную сторону дела, а не за внедрение этого эффекта в IT-технологии.

Конечно, это не значит, что авторы вообще не догадывались о возможных применениях — ведь недаром Петер Грюнберг запатентовал технологию создания магнитных датчиков с использованием эффекта гигантского магнетосопротивления. Они прекрасно понимали, что в современном высокотехнологическом мире всякий принципиально новый материал рано или поздно найдет свое практическое применение. Именно такой же интерес движет сейчас исследователями, изучающими, скажем, метаматериалы с удивительными оптическими свойствами. Мы можем быть абсолютно уверены, что они найдут себе самые разнообразные применения, хоть сейчас и трудно предугадать, какие именно.

За открытием гигантского магнетосопротивления последовало открытие других схожих эффектов и бурное развитие всей области. Оптимизировав схему слойки, исследователи придумали «спиновый вентиль» — именно он и используется сейчас в головках жестких дисков. При замене немагнитного металла изолятором появился эффект туннельного магнетосопротивления, на основе которого сейчас создают энергонезависимую магнеторезистивную память (MRAM, Magnetoresistive Random Access Memory). Наконец, физики обратили свое внимание и на «естественно-слоистые» материалы. Именно в таком материале — манганите лантана — был в 1994 году открыт новый, гораздо более сильный эффект — колоссальное магнетосопротивление,

причина которого пока не выяснена до конца, но сенсоры на основе которого уже тоже запатентованы.

Эффект Холла в металлах, полупроводниках, ферромагнетиках и его приложения.

Основная сущность эффекта Холла заключается в том, что в проводнике с током плотностью \mathbf{j} , помещенным в магнитное поле \mathbf{B} , возникает электрическое поле в направлении перпендикулярном \mathbf{j} и \mathbf{B} :

$$\mathbf{E}_H = R [\mathbf{B} \mathbf{j}] \quad (1)$$

R называется постоянной Холла и служит основной характеристикой эффекта. Эффект был открыт Э.Г.Холлом в 1879 году в тонких пластинках золота и является одним из наиболее важных гальваномагнитных явлений.

Холл Эдвин Герберт, 1855-1938, американский физик. Родился в Гореме. В 1880 году окончил университет Дж.Гопкинса. В 1881-1921 годах работал в Гарвардском университете, с 1895 года – профессор. Член Национальной АН США с 1911 года. Исследования термоэлектричества, электро- и теплопроводности металлов, термомагнитных и гальваномагнитных явлений[45].

Соотношение (1) описывает эффект Холла в изотропном (например, поликристаллическом) проводнике в слабом магнитном поле. Для наблюдения эффекта прямоугольные пластины из исследуемого вещества с длиной значительно больше ширины b и толщины d , вдоль которых течет ток $I = jbd$, помещают в магнитное поле \mathbf{H} , перпендикулярное плоскости пластинки. На середине боковых граней перпендикулярно току расположены электроды, между которыми измеряется э.д.с. Холла: $V_H = E_H b = RHI / d$.

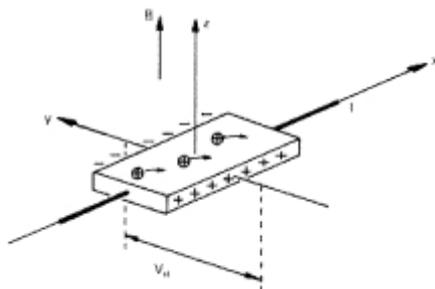


Рис.1. Эффект Холла в проводнике.

Эффект Холла объясняется взаимодействием носителей заряда (электронов проводимости и дырок) с магнитным полем. В магнитном поле на заряженные частицы действует сила Лоренца: $\mathbf{F} = e[\mathbf{B} \mathbf{v}]$, где $\mathbf{v} = \mathbf{j} / en$ – средняя скорость направленного движения носителей в электрическом поле, n - концентрация носителей, e - их заряд. Под действием этой силы частицы отклоняются в направлении, перпендикулярном \mathbf{B} и \mathbf{j} . В результате на боковой грани пластины происходит накопление зарядов и возникает электрическое поле Холла \mathbf{E}_H , которое, в свою очередь, действуя на заряды, уравновешивает силу Лоренца. При равновесии $e\mathbf{E}_H = e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, откуда:

$$R=1/ en \quad (2)$$

Знак R совпадает со знаком носителей заряда. Для металлов, у которых $n \sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $R \sim 10^{-3} \text{ см}^3/\text{Кл}$; у полупроводников $R \sim 10^{-5} \text{ см}^3/\text{Кл}$.

Для анизотропных кристаллов $R=r/en$, где r – величина, близкая к единице, зависящая от направления магнитного поля относительно кристаллографических осей. В области сильных магнитных полей $r=1$.

В полупроводниках в электропроводности участвуют одновременно электроны проводимости и дырки. При этом постоянная Холла выражается через парциальные проводимости электронов σ_e и дырок σ_d и их концентрации n_e и n_d .

Для слабых полей:

$$R = \frac{\sigma_e^2/n_e + \sigma_d^2/n_d}{e(\sigma_e + \sigma_d)^2} \quad (3)$$

Для сильных полей:

$$R = \frac{1}{e(n_e + n_d)} \quad (4)$$

Критерием сильного поля является: $\omega_c \tau \gg 1$, где $\omega_c = eB/m$ -циклотронная частота. При $n_e = n_d$ для всех значений B :

$$R = \frac{\sigma_e - \sigma_d}{en(\sigma_e + \sigma_d)} \quad (5)$$

Знак R соответствует основным носителям.

Для металлов величина R зависит от зонной структуры (формы Ферми поверхности). Для замкнутых поверхностей Ферми и в сильных магнитных полях постоянная Холла изотропна, а выражение для R совпадает с ранее полученным: $R=1/en$. Для открытых поверхностей Ферми R - тензор. Однако, если направление магнитного поля относительно кристаллографических осей выбрано так, что не возникает открытых сечений поверхности Ферми, то выражение для R также совпадает с соотношением (2).

В ферромагнетиках электроны подвергаются совместному действию внешнего магнитного поля и магнитного поля доменов. Это приводит к особому ферромагнитному эффекту Холла. Экспериментально найдено, что $E_H = (RB + R_1 M) j$, где R – обыкновенная, а R_1 - аномальная постоянная Холла, M – величина намагниченности.

Эффект Холла – один из наиболее продуктивных методов изучения энергетического спектра носителей заряда в металлах и полупроводниках. Зная R можно определить знак носителей заряда и оценить их концентрацию, что позволяет сделать заключение о количестве примесей в полупроводниках. Линейная зависимость R от напряженности магнитного поля используется для измерения H .

Датчики Холла представляют собой тонкую прямоугольную пластинку (площадью несколько мм^2) или пленку, изготовленную из полупроводника (Si, Ge, InSb, InAs). Датчик имеет 4 электрода для подвода тока и съема ЭДС Холла. Чтобы избежать механических повреждений пластинку монтируют (а пленку напыляют в вакууме) на прочной подложке из диэлектрика (керамики). Для получения наибольшего эффекта толщина пластинки (пленки) делается возможно меньшей. Датчики Холла применяют для бесконтактного измерения магнитных полей – от 10^{-6} до 10^5 Э. При измерении слабых магнитных полей датчики Холла монтируются в зазоре ферро- или ферромагнитного стержня (концентратора), что позволяет значительно повысить чувствительность датчика. Так как в полупроводниках концентрация носителей зарядов, а следовательно и постоянная Холла, зависит от температуры датчики для прецизионных измерений необходимо термостабилизировать, либо применять сильно легированные полупроводники (последнее снижает чувствительность датчика).

При помощи датчиков Холла можно измерять любую физическую величину, которая связана с магнитным полем, в частности, силу тока. На основе датчиков Холла созданы бесконтактные амперметры на токи до 100 кА. Датчики Холла применяют также в аналоговых перемножающих устройствах. При этом токи, пропорциональные перемножаемым величинам, используются один для питания датчика, другой для создания магнитного поля, а ЭДС Холла пропорциональна произведению этих величин. Кроме того, датчики Холла применяют в измерителях линейных и угловых перемещений, а также в измерителях градиента магнитного поля, магнитного потока и мощности электрических машин, в бесконтактных преобразователях постоянного тока в переменный и, наконец, в воспроизводящих головках систем записи.

Хотя исследования эффекта Холла в металлах, полупроводниках и ферромагнетиках с момента его открытия велись достаточно интенсивно, принципиально новые фундаментальные результаты были получены в начале 80-х годов XX века. Как следствие, за тринадцать лет Нобелевская премия по физике дважды присуждалась за исследование квантового эффекта Холла. Первый раз это была премия, присужденная профессору Марбургского университета (Германия, Гессен) Клаусу фон Клитцингу в 1985 году за открытие квантового эффекта Холла, и второй раз премией были удостоены в 1998 году профессор Стенфордского университета Роберт Лафлин (за интерпретацию дробного квантового эффект Холла), профессор Колумбийского университета Хорст Штермер и профессор Принстонского университета Даниель Цуи (за открытие и основополагающие работы по дробному квантовому эффекту Холла). Интересно отметить, что открытие квантового эффекта Холла и дробного квантового эффекта Холла состоялось почти одновременно и все основные результаты были опубликованы за весьма короткий период с 1980 по 1983 год. Однако потребовалось еще несколько лет для признания всей важности

квантового эффекта Холла и больше 15 лет для того, чтобы разобраться в физической сущности дробного квантового эффекта Холла.

Двумерные МДП – структуры и гетероструктуры

Одной из основных особенностей квантового эффекта Холла является то, что он реализуется не трехмерных, а в двумерных системах. Для реализации двумерных систем подходящим объектом была бы металлическая фольга толщиной несколько десятков ангстрем, однако совершенно неясно, как такой тонкий металлический образец можно изготовить. Тем не менее, двумерные металлические системы исследуются уже более 30 лет. Оказалось, что они достаточно легко воспроизводятся в полупроводниковом приборе, который называется полевым транзистором. Принципиальное устройство его устройство приведено на рис.2

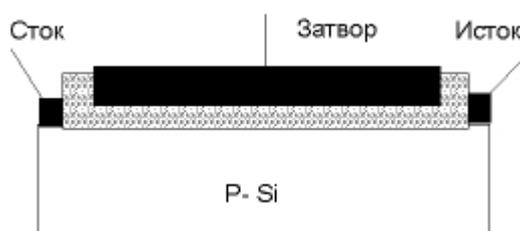


Рис.2. Принципиальная схема устройства полевого транзистора

Иногда его называют также МДП-транзистором, т.е. транзистором со структурой металл-диэлектрик-полупроводник. (В английской литературе используют аббревиатуру SOI). Кремниевую пластину, имеющую дырочную проводимость, окисляют с поверхности, образуя тонкий слой SiO_2 . С двух сторон вжигаются электроды, которые называются истоком и стоком. Поверх оксида напыляется слой металла и приваривается управляющий электрод, называемый затвором.

Если на затвор подать положительный потенциал, то дырки, находящиеся в полупроводниковой пластине, будут уходить как можно дальше от затвора, а электроны, (которых мало в дырочном материале), будут наоборот подтягиваться к диэлектрическому слою, создавая между истоком и стоком проводящий электронный канал. Настолько тонкий, что его вполне можно считать двумерным. Концентрация электронов в двумерном слое определяется напряжением на затворе и практически не зависит от температуры. Это и позволяет говорить о двумерном металле, а не о двумерном полупроводнике, поскольку независимость концентрации электронов проводимости от температуры является характерным признаком металла. Однако в практической реализации МДП-транзистора возникает ряд проблем. Окисление поверхности кремния приводит к микроскопическим напряжениям и разупорядочению связей на поверхности, так как параметры решетки кремния и SiO_2 не совпадают. Это

настолько мучительная проблема, что обычно окисление проводят при небольшом парциальном давлении воды, чтобы водород мог садиться на свободные связи кремния.

Гетероструктуры арсенида галлия в этом отношении лучше. Гетероструктуры получаются при создании контактов двух полупроводников с различными ширинами запрещенных зон. Для электронов, движущихся в узкозонном полупроводнике и имеющих меньшую энергию, граница будет играть роль потенциального барьера. Два гетероперехода ограничивают движение электрона с двух сторон, образуя потенциальную яму. Таким образом, создают квантовые ямы, помещая тонкий слой полупроводника с узкой запрещенной зоной между двумя слоями материала с более широкой запрещенной зоной. В результате электроны заперты в одном направлении, что и приводит к квантованию энергии поперечного движения. В то же время в двух других направлениях движение электронов будет свободным, поэтому электронный газ в квантовой яме становится двумерным. Аналогично можно приготовить структуру, содержащую квантовый барьер. Для этого следует поместить тонкий слой полупроводника с широкой запрещенной зоной между двумя полупроводниками с узкой запрещенной зоной.

Для изготовления подобных структур разработано несколько типов технологических процессов. Однако, наилучшие результаты в приготовлении квантовых структур достигнуты с помощью метода молекулярно лучевой эпитаксии. Несколько потоков атомов, которые получают испарением вещества из отдельных нагретых источников, одновременно направляют на тщательно очищенную подложку. Чтобы избежать загрязнения, выращивание структуры производят в глубоком вакууме. Весь процесс управляется компьютером. Химический состав и кристаллическая структура выращиваемого слоя в процессе роста контролируется методами рентгеновской и Оже-спектроскопии, состав газовой фазы - методами масс-спектроскопии. Таким образом, удается выращивать совершенные монокристаллические слои толщиной всего в несколько периодов решетки. Образование гетероперехода, требующее стыковки кристаллической решетки, возможно лишь при совпадении типа, ориентации и периода кристаллической решетки сращиваемых материалов. Кроме того, в идеальном гетеропереходе граница раздела должна быть свободна от структурных и других дефектов, а также от механических напряжений. Наиболее широко применяются монокристаллические гетеропереходы на основе арсенида галлия GaAs и твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$, в котором часть атомов галлия, обычно в пределах от 0,15 до 0,35, замещена атомами алюминия. Ширина запрещенной зоны в арсениде галлия составляет 1,5 эВ, а в твердом растворе $Al_xGa_{1-x}As$ она растет с ростом x . Так, при $x=1$, т.е. в соединении AlAs, ширина запрещенной зоны равна 2,2 эВ. Поверхность раздела между GaAs и твердым сплавом

радиуса орбиты электрона в магнитном поле, в виде: $\omega = \omega_c = eB/m$.

В классической механике энергия электрона в магнитном поле может быть любой и определяется только значением скорости v .

Обсудим теперь, к каким результатам приводит квантовомеханическое рассмотрение задачи о движении электрона в магнитном поле. В этом случае некоторые результаты классической механики остаются справедливыми, а некоторые существенно изменяются. Хорошо известно, что вращательное движение в плоскости может быть получено суперпозицией двух колебаний, происходящих в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По этой причине энергия электрона в сильном магнитном поле определяется выражением:

$$E = (\hbar/2\pi)\omega (k + 1/2), \quad k = 0, 1, 2,$$

которое описывает энергию квантового гармонического осциллятора с частотой колебания ω , совпадающей с классической циклической частотой обращения электрона вокруг силовой линии магнитного поля ω_c .

В квантовом случае сохраняется, в принципе, и другой результат классической механики: каждый электрон локализован в пространстве и занимает некоторую площадь двумерного канала. Характерным размером, определяющим область, внутри которой находится электрон, является теперь не классический радиус орбиты электрона r , а так называемая магнитная длина:

$$l = (\hbar/2\pi eB)^{1/2} \quad (6)$$

Площадь, занимаемая электроном, при этом равна просто πl^2 .

Таким образом, в квантовом случае энергия электронов пробегает дискретный ряд значений (квантуется) и электроны занимают эквидистантные (расположенные на одинаковом расстоянии друг от друга) энергетические уровни. Эти уровни называются уровнями Ландау. Число электронов, которое может разместиться на каждом уровне Ландау, может быть легко подсчитано из простых соображений. Дело в том, что электроны являются Ферми-частицами и поэтому два электрона, находящихся на одном уровне энергии и имеющие одинаковый спин, не могут располагаться в одном и том же месте в плоскости канала. В противном случае будет нарушено незыблемое для Ферми-частиц правило (принцип Паули): два фермиона не могут находиться в одном квантовом состоянии.

Будем для простоты считать, что площадь двумерного металла является единичной. Тогда число электронов на каждом уровне Ландау есть просто отношение площади канала к площади πl^2 , занимаемой одним электроном. Отсюда:

$$n_e = 1/\pi l^2 = 2eB/h$$

Если выбрать численное значение индукции магнитного поля $B = 10^2$ Тл то получается, что на каждом уровне Ландау может разместиться примерно 10^{12} электронов на каждый квадратный сантиметр площади канала.

Полученный результат нуждается в некоторой коррекции. В сильном магнитном поле каждый уровень Ландау расщепляется на два спиновых подуровня, на каждом из которых может разместиться в два раза меньше электронов, чем мы только что подсчитали. А именно:

$$n_e = 1/2\pi l^2 = eB/h \quad (7)$$

Это расщепление уровней достаточно велико, так что спиновые подуровни совершенно не перекрываются. Учет спинового расщепления уровней Ландау не дает ничего принципиально нового при рассмотрении квантового эффекта Холла, поэтому мы в дальнейшем будем говорить об уровнях Ландау, хотя на самом деле речь всегда будет идти о подуровне с определенной ориентацией спина.

Проводимость и эффект Холла в двумерном металле

Рассмотрим теперь проводимость и эффект Холла двумерного металла в квантующем магнитном поле.

Из определения холловского сопротивления следует, что величина R_H пропорциональна B и график зависимости $R_H(B)$ должен иметь вид прямой линии, выходящей из начала координат, тангенс угла наклона которой к оси абсцисс равен $1/en$. Для нормального трехмерного металла при комнатной температуре и не слишком высоких значениях магнитного поля (1-5 Тл) экспериментальные результаты вполне хорошо соответствуют описанной выше классической картине поведения холловского сопротивления. Экспериментальные результаты в области сильных полей, представленные на рис. 3, радикально отличаются от этой простой зависимости. Эксперименты проводились К. фон Клитцингом в двумерной МДП-структуре при температуре 1 К. Очевидно, что в этих условиях классическое рассмотрение неприменимо и нужно учитывать квантование движения электронов. Холловское сопротивление обнаруживает ряд ярко выраженных ступенек. Значение сопротивления для этих ступенек строго определяется выражением $R_H = h/(ve^2)$, где $v = 1,2,3,\dots$, на рисунке видны ступеньки со второй по десятую. Константа h/e^2 примерно равна 25 кОм.

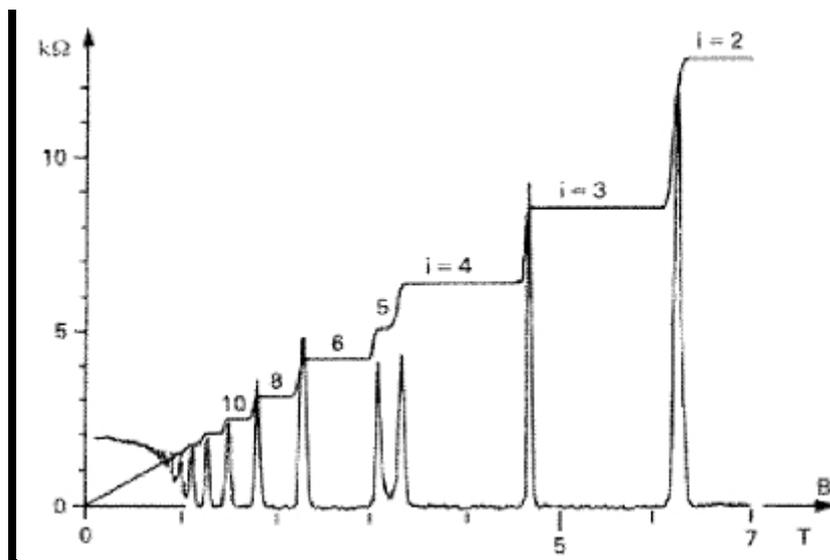


Рис. 3. Зависимость холловского сопротивления от величины приложенного магнитного поля. Кривая с острыми пиками - это зависимость омического сопротивления образца от магнитного поля. Как следует из графика, сопротивление каждый раз обращается в нуль, когда квантовый эффект Холла выходит на плато

Величина Холловского сопротивления оказывается настолько стабильной (не зависящей от параметров образца и температуры), что это позволяет использовать ее в качестве национального стандарта электрического сопротивления в целом ряде развитых стран мира. Наиболее употребительным названием единицы электрического сопротивления является Клитцинг.

Клаус фон Клитцинг, немецкий физик, родился 28.06.1943 года в оккупированной части Польши в г. Шрода. Среднее образование получил в Артланд-гимназии г. Квахенбрюна, что позволило ему специализироваться по физике в Техническом университете Брауншвейга, куда он поступил в 1962 году. Докторскую диссертацию защитил в 1969 году по методам определения времени жизни носителей тока в антимониде индия. Преподавал физику в Вюрцбурге, Гренобле, Мюнхене, с 1980 года профессор. С 1985 года директор Института физики твердого тела Макса Планка в Штутгарте. В 1980 году открыл квантовый эффект Холла. Нобелевская премия по физике (1985), премии Вальтера Шоттки Германского физического общества (1981) и Хьюлетта Паккарда Европейского физического общества (1982).[45]

В представлении Шведской королевской академии отмечалось, что работы Клитцинга «открыли для исследований новую область, необычайно важную не только для теории, но и для приложений... Мы имеем здесь дело с новым явлением в квантовой физике, причем явлением, характерные особенности которого поняты лишь частично».

Зависимость холловского и омического сопротивлений от магнитного поля в квантовом эффекте Холла определяется следующими факторами. Будем считать, что полное число электронов в двумерном токовом слое фиксировано и напряжение на затворе постоянно. В этом случае максимальная энергия E_F , которую имеют электроны проводимости в кристалле (энергия Ферми), практически не зависит от магнитного поля. Если $(\hbar/2\pi)\omega \ll E_F$, то расстояние между уровнями Ландау $(\hbar/2\pi)\omega$ прямо пропорционально B и будет линейно уменьшаться при уменьшении B .

Для нашего случая это значит, что если при $B = 7$ Тл электроны размещались на первом и втором уровнях Ландау, то при $B = 5$ Тл электроны разместятся уже на трех уровнях Ландау. Иначе говоря, при уменьшении магнитного поля уровни Ландау поочередно пересекают уровень Ферми. При уменьшении магнитного поля полное число электронов не изменяется, а количество электронов, которые могут разместиться на одном уровне Ландау, уменьшается (это число одинаково для всех уровней Ландау, лежащих ниже уровня Ферми) в соответствии с формулой (7). Поэтому теперь для размещения всех электронов потребовалось занять следующий уровень энергии. Ясно, что если под уровнем Ферми находится точно ν полностью заполненных уровней Ландау, то $n = \nu n_e$ и если подставить значение n_e из формулы (7), то получаем плотности электронов выражение $n = \nu e B / h$, которое позволяет объяснить численное значение величины R_H в квантовом эффекте Холла.

Действительно, поскольку $B = nh / \nu e$ и $R_H = RB$ имеем, что

$$R_H = h / \nu e^2 \quad (8)$$

выражается только через фундаментальные константы, не зависит от характерных параметров образца и находится в полном соответствии с экспериментально полученным результатом.

Обратимся теперь к поведению омического сопротивления. Необходимо заметить, что при измерении квантового эффекта Холла по образцу пропускается некоторый фиксированный ток, а измеряемыми величинами являются продольная и поперечная разности потенциалов. Омическим сопротивлением называется отношение продольной разности потенциалов к силе тока, пропускаемой через образец.

Делались многочисленные попытки выяснить численное значение сопротивления образца в режиме квантового эффекта Холла и зависимость его от температуры. При наиболее низких температурах минимальное значение сопротивления $R_H < 10^{-7}$ Ом, причем оно очень сильно падает с понижением температуры. Таким образом, эксперимент не исключает нулевое значение омического сопротивления. Однако следует признать, что в настоящее время, видимо, не существует до конца непротиворечивой

теории, описывающей протекание тока в образце в режиме квантового эффекта Холла. Можно лишь утверждать, что важную роль в формировании токовых состояний играют примеси. С одной стороны они приводят к уширению уровней Ландау, а с другой вызывают локализацию электронных состояний. На рис. 4 приведен схематический график зависимости плотности состояний электронов $N(E)$ от энергии.

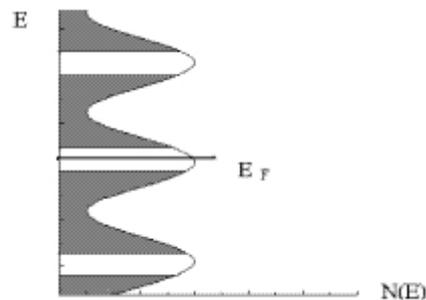


Рис. 4. Зависимости плотности состояний электронов от энергии при наличии примесей

Напомним, что выражение $N(E)dE$ по определению имеет смысл числа разрешенных состояний в интервале энергии от E до $E+dE$. На этом рисунке пики соответствуют уширенным уровням Ландау, затененные области — локализованным, а светлые области вблизи экстремальных значений $N(E)$ — токовым состояниям электронов проводимости.

Как только уровень Ферми за счет движения уровней Ландау по мере роста магнитного поля попадает в область делокализованных электронов, омическое сопротивление сразу обращается в нуль и остается таковым, пока уровень Ферми не попадет в область локализованных состояний. По существу эта простая идея может объяснить всю совокупность экспериментальных фактов для целочисленного квантового эффекта Холла, хотя, как уже отмечалось, при более детальном рассмотрении остается целый ряд не до конца понятных вопросов о природе холловского сопротивления.

Дробный квантовый эффект Холла

Дробный квантовый эффект Холла был открыт в 1982 г Цуи, Штермером и Госсардом. Ими было обнаружено, что, если высококачественный образец с малым количеством примесей поместить при очень низкой температуре (порядка 0.1 К) в магнитное поле напряженностью 15 - 20 Тл, то возникают холловские плато и глубокие провалы продольного сопротивления при дробных заполнениях самого нижнего уровня Ландау ($\nu = 1/3$, $\nu = 2/3$), подобно тому, как это имело место при целых числах заполнения. Нобелевская премия по физике 1998 года была присуждена только

Штермеру и Цуи, Арт Госсард, получавший сверхчистые полупроводниковые материалы для исследований, Нобелевским комитетом был обделен. Возможно потому, что Нобелевская премия не может присуждаться более чем трем исследователям. Роберт Лафлин в своей Нобелевской премии по этому поводу сказал: « Вместе со своими коллегами я сожалею о том, что Арт Госсард не смог разделить с нами эту премию, поскольку все в физике твердого тела понимают, что материалы - это душа нашей науки, и никакой серьезный интеллектуальный прогресс без них невозможен».

Все нобелевские лауреаты по физике 1998 года работают в американских университетах. Они близки по возрасту. Лафлин родился в 1950 г, Штермер - в 1949 г, Цуи - в 1939 г. Коренным американцем является только родившийся в Калифорнии Лафлин. Штермер родился и учился в Германии, а Цуи родился в Китае, но учился уже в Чикаго. Видимо, проблема «утечки мозгов» существует не только в России.

Хорст Штёрмер (Horst L.Stermer) родился в 1949 году во Франкфурте-на-Майне. Ученую степень по физике получил в Штутгартском университете в 1977 году. В 1992 - 1997 годах возглавлял отдел физических исследований Лаборатории "Bell labs", а в 1998 году стал заместителем директора Лаборатории "Bell labs" в составе компании "Lucent Technologies" и профессором Колумбийского университета (Нью-Йорк).

Дэниел Цуи (Daniel C.Tsui), родившийся в 1939 году в китайской провинции Хэнань, учился в Чикагском университете и теперь гражданин США. В 1969 году в Чикагском университете защитил диссертацию по физике полупроводников. С 1982 года - профессор Принстонского университета.[45]

Впоследствии оказалось, что наблюдаются и другие дробные значения заполнения уровня Ландау, но они еще легче разрушаются примесями и требуют еще более низких температур. Типичные экспериментальные результаты приведены на рис. 5

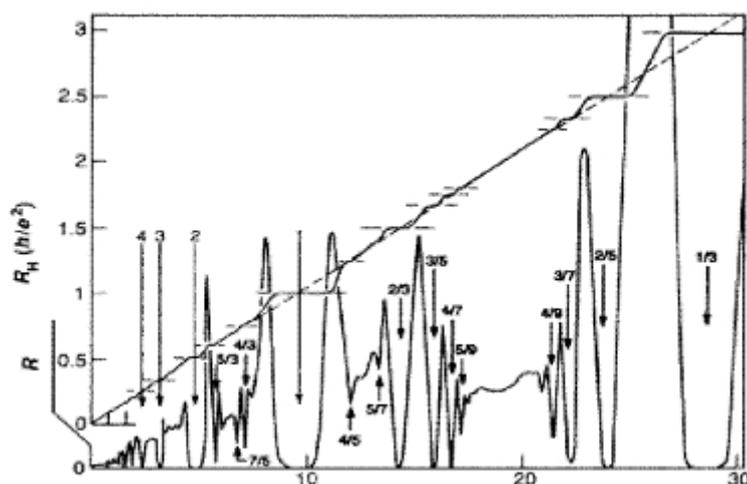


Рис. 5. Холловское и омическое сопротивления в режиме дробного квантового эффекта Холла

Здесь по оси абсцисс отложено магнитное поле в единицах Тесла, а по оси ординат значения холловского и омического сопротивлений. Стрелками отмечено значение магнитного поля, при котором омическое сопротивление минимально. На рисунке хорошо видно плато холловского сопротивления при дробном значении числа заполнения $\nu = 1/3$ уровня Ландау.

Последовательная и исчерпывающая интерпретация дробного квантового эффекта Холла все еще остается проблемой, хотя идеи, позволяющие понять природу этого эффекта, были высказаны Р. Лафлиным еще в 1983 г. Сразу было ясно, что эффект обусловлен взаимодействием электронов между собой, поскольку он наблюдается только в ультрасильных магнитных полях, когда область локализации электрона в магнитном поле является малой, а их плотность становится высокой. Наличие холловского плато при $\nu = 1/3$, например, говорит о том, что энергия электронной системы в расчете на одну частицу должна испытать скачок, когда заполнится точно $1/3$ уровня Ландау. Иначе говоря, в спектре энергии электронов при заполнении уровня на $1/3$ должна быть щель. Если бы такую щель удалось обнаружить, то дальнейшая интерпретация дробного квантового эффекта Холла практически не отличалась от интерпретации целочисленного аналога.

Поэтому первоначально была высказана идея, что электроны, стремясь разойтись как можно дальше друг от друга, упорядочатся в некоторую правильную структуру, так называемый, Вигнеровский кристалл. Но оказалось, что не все так просто. Однако тщательные вычисления энергии электронной системы в расчете на один электрон в модели Вигнеровского кристалла не обнаружили никаких аномалий при дробных числах заполнения уровня Ландау.

Квантовая жидкость Лафлина. Композитные частицы.

Иную теорию дробного квантового эффекта Холла предложил Роберт Лафлин.

Роберт Лафлин (Robert B. Laughlin) родился 1 ноября 1950 года в г. Визалия, США. Степень бакалавра физики в Университете Беркли в Калифорнии. докторскую диссертацию по физике защитил в 1979 года в Массачусеттском технологическом институте. С 1989 года - профессор физики в Стэнфордском университете (Калифорния). В период с 2004 по 2006 год работал президентом Корейского института науки и техники в Дежеоне, в Южной Корее. [48]

Состояние дробного квантового эффекта Холла не может быть адиабатически преобразовано в какое-либо состояние невзаимодействующих электронов. По этому поводу Р.Лафлин [20] сказал, что «всегда удивлялся тому, насколько это утверждение расстраивает людей, но при правильном определении состояния материи и полном понимании целочисленного квантового эффекта Холла к другому заключению прийти невозможно. Иначе холловская проводимость с необходимостью квантовалась бы на целые числа, так как она сохраняется при адиабатическом преобразовании и равна целому числу в невзаимодействующей системе из-за калибровочной инвариантности и дискретности заряда электрона. Поэтому состояние, отвечающее дробному эффекту Холла представляет собой что-то беспрецедентное – это новое состояние материи.

Внешне все выглядит, однако, почти так же, как в целочисленном эффекте, почти во всех деталях. Существует плато. Холловская проводимость на плато – это просто число, умноженное на e^2/h . Параллельное сопротивление на плато равно нулю. Отклонения от точного квантования из-за конечности температуры либо имеют активационную природу, либо подчиняются моттовскому закону для прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка, в зависимости от температуры. Единственное качественное различие между двумя эффектами – это сама холловская проводимость.

С учетом этих фактов самое простое и очевидное объяснение, а в действительности и единственно возможное, состоит в том, что, новое состояние может быть преобразовано во что-то подобное заполненному уровню Ландау, но только с возбуждениями несущими дробный заряд. Адиабатическое увеличение потока на квант, которое переводит гамильтониан в себя, должно переносить целое число этих объектов через образец. Локализация этих объектов должна объяснять появление плато. Все соображения о точности квантования должны работать, как и прежде. Как это обычно бывает с непредсказуемыми явлениями, именно эксперименты, а не теории скажут нам, так это или нет. Теории могут

помочь нам лучше понять эксперимент, в особенности, если обеспечат нам хороший модельный вакуум, но главное основание этих выводов состоит в том, что эксперименты не оставляют нам альтернативы».

Предложенное Лафлином основное состояние имеет вид:

$$\Psi(z_i-z_j) = \prod (z_i-z_k)^m \exp[-\sum_j^N |z_j|^2/4l^2] \quad (9)$$

где m - нечетное целое число, а $z_j = z_i - iy_j$ – координата j -той частицы в комплексном представлении.

Хорст Штермер шутил, что весь его эффект укладывается в одно маленькое уравнение. Но, по замечанию Лафлина, это уравнение только потому такое простое, что Х.Штермеру и Д.Цуи посчастливилось сначала найти состояние $\nu = 1/3$. Большинство других вакуумов с 30 нечетными знаменателями открытых в настоящее время не имеют таких простых прототипов, хотя все они могут быть адиабатически преобразованы друг в друга. Волновая функция (9) была изначально предложена Лафлином как вариационное основное состояние для некоторого модельного гамильтониана. Главная черта данной волновой функции заключается в том, что в термодинамическом пределе она описывает систему электронов с плотностью $1/(2\pi ml^2)$. В этом можно убедиться, заметив, что квадрат модуля волновой функции совпадает с функцией распределения классической однокомпонентной плазмы. Полагая, что

$$|\Psi(z_1, \dots, z_N)|^2 = \exp[-\beta\Phi(z_1, \dots, z_N)] \quad (10)$$

и выбирая $\beta = 1/m$, чтобы аналогия стала более наглядной, получаем

$$\Phi(z_1, \dots, z_N) = -2m^2 \sum_j^N \ln |z_i-z_k| + m \sum_j^N |z_j|^2/2l^2 \quad (11)$$

Это потенциальная энергия частиц с зарядом m , которые отталкиваются логарифмически (двумерный кулоновский потенциал) и притягиваются к началу координат с однородной плотностью заряда $1/(2\pi l^2)$. Для локальной электронейтральности, необходимой в плазме, частицы должны иметь плотность $\rho = 1/(2\pi ml^2)$. Можно показать, что при малых m это состояние не является кристаллическим, а представляет собой сильно коррелированную электронную жидкость, в которой расстояние между частицами меняется скачком (квантуется). Эта волновая функция позволяет также объяснить возникновение щели в спектре энергии электрона при некоторых дробных заполнениях уровня Ландау. Впервые это было показано Д.Холдейном и Э.Резайи численными расчетами.

В теории Лафлина электронная жидкость обладает еще одной особенностью, выделяющей ее в принципиально новый тип квантовых жидкостей. Элементарные возбуждения в ней имеют дробный заряд и

являются композитными частицами. В сильных магнитных полях соответствующих дробному квантовому эффекту число квантов потока магнитного поля на единицу площади больше числа электронов в двумерной системе. Поэтому происходит захват электроном нескольких квантов магнитного потока с образованием композитных частиц. Хотя электроны являются фермионами, образованные на их основе композитные частицы, в зависимости от числа захваченных квантов, могут быть как фермионами, для четного числа m захваченных квантов, так и бозонами для нечетного m . (Каждый захваченный квант магнитного потока вносит в волновую функцию дополнительный перестановочный множитель). Поскольку внешнее магнитное поле включено в композитные частицы, то они находятся в условиях эффективного его отсутствия. Кванты потока действуют как невидимый щит, защищающий композитную частицу не только от внешнего поля, но и от действия других электронов. Таким образом, при переходе к композитным частицам, которые практически не взаимодействуют друг с другом, устраняется проблема межэлектронного взаимодействия. Поведение состояний композитных частиц радикально различается, в зависимости от того являются ли композитные частицы бозонами или фермионами.

Бозонами являются композитные частицы из электрона и нечетного числа квантов магнитного поля. Минимальным таким числом является 3, что соответствует заполнению нижнего уровня Ландау на $\nu = 1/3$. Будучи бозонами и находясь в условиях нулевого магнитного поля, композитные частицы испытывают бозе-конденсацию в новое основное состояние с характерной для бозе-конденсата энергетической щелью. Это и есть искомая щель, которая необходима для возникновения квантования холловского сопротивления и обращения в нуль обычного сопротивления.

Когда магнитное поле превышает величину, соответствующую точному заполнению $\nu = 1/3$, часть квантов магнитного потока не может быть захвачена какими-нибудь электронами, так как это потребовало бы изменение симметрии конденсированного состояния. В электронном слое такие кванты образуют вихри с дефицитом заряда $1/3$ от заряда электрона. Что позволяет интерпретировать их как квазичастицы (дырки) с эффективным положительным зарядом $+e/3$. Можно провести аналогичное рассуждение для магнитного поля намного меньше, чем для $\nu = 1/3$, тогда появятся квазиэлектроны с эффективным отрицательным зарядом $-e/3$. Квазичастицы могут свободно перемещаться по двумерной плоскости и являются переносчиками электрического тока. Образование плато в дробном квантовом эффекте Холла происходит, как и в целочисленном квантовом эффекте, вследствие флуктуаций потенциала и возникающей в результате этого локализации носителей. Только в дробном квантовом эффекте Холла носители - это не электроны, а причудливые квазичастицы с дробным зарядом.

Дробный квантовый эффект Холла при $\nu=1/5$, $1/7$ и т.д. с квазичастицами имеющими заряд $e/5$, $e/7$ и т.д. объясняется точно также, как дробный квантовый эффект Холла при $\nu=1/3$, т.е. захватом 5, 7 и т.д. квантов потока на каждый электрон. Фактически даже такие состояния как $\nu=2/3$, $4/5$, $6/7$ и т.д. и $\nu=1+1/3$, $\nu=1+1/5$ и т.д. объясняются аналогично. Например, $\nu=2/3$ рассматривается как уровень Ландау на $1/3$ заполненный «отсутствующими» электронами. Таким образом, все дроби, отвечающие фактору заполнения уровня Ландау вида $\nu=p\pm 1/q$, часто называемые первыми дробями, поддаются рациональному объяснению.

Фермионные состояния композитных частиц с захватом четного числа квантов (простейшее из них $\nu=1/2$, в котором при половинном заполнении нижнего уровня Ландау магнитное поле содержит в два раза больше квантов потока на единицу площади, нежели носителей, а электрон захватывает два кванта потока) не могут испытывать бозе-конденсации. Композитные фермионы последовательно заполняют энергетические состояния, Однако, поскольку магнитное поле включено в них, то их движение происходит как при $B=0$ (по прямолинейным траекториям вместо ларморовых окружностей). При этом композитные фермионы характеризуются не массой электрона, а эффективной массой зависящей от величины магнитного поля и динамики взаимодействия электронов. Красивая картина возникает, когда один из квантов потока смещен относительно электрона, что является естественным следствием принципа Паули. В этом случае на двумерной электронной плоскости появятся электрические диполи.

Обобщение теории Р.Лафлина на более сложные композитные квазичастицы дает следующее выражение для их заряда $ep/(2mp\pm 1)$, где $p, m=1, 2, 3...$ Существование некоторой части этих состояний подтверждено экспериментами Х.Штермера, Д.Цуи, А.Госсарда с сотрудниками. Фазовая диаграмма дробного квантового эффекта Холла предложена С.Кивелсоном, Д.-Ч. Ли и Ш. Чжаном. Необычная ферми-поверхность при половинном ее заполнении и объяснение этого эффекта в терминах композитных фермионов дано П.Гальпериным, П.Ли и Н.Ридом.

Концепция Р.Лафлина является наиболее распространенной, но существуют и другие теоретические подходы. Так, Д.Джейн показал, что последовательность основных состояний в дробном квантовом эффекте Холла может быть сконструирована другим способом, который совсем не использует понятие квазичастиц. Интерпретация дробного квантового эффекта Холла на основе Вигнеровского плоского (магнитного) кристалла с гексагональной плотной упаковкой в последнее время активно развивается В.П.Быковым [7]. Определенные успехи в описании данного эффекта удалось получить также с помощью метода обобщенных когерентных состояний [20].

Из последующих экспериментальных исследований следует отметить работы группы М. Резникова (Технический университет Хайфа), в которых на многослойные гетероструктуры накладывались квантовые ворота, состоящие из электродов с отрицательным потенциалом. Магнитный электронный кристалл или форма с ближним порядком не может пройти сквозь эти ворота и разрушается, так что дальше электронная плазма идет просто как обычный хаотический ток. Шумы обычных токов измерялись давно, и известно, что они пропорциональны как самому току, так и заряду элементарного носителя тока. В обычных металлах таким зарядом является элементарный электронный заряд. В экспериментах израильской группы зависимость шумов тока от величины рассеянного тока хорошо описывалась кривыми, соответствующими заряду носителей $e/3$ и $e/5$. В измерениях дробового шума, проведенных Л. Саминадийяром и независимо Р. Де Пиччиотто заряд квазичастиц определялся по флуктуациям утечки тока через узкую часть холловского образца. Эти эксперименты интересны еще и тем, что туннелирование происходит между краями образца, а на краях спектр не имеет щели, как в объеме, но соответствует бесщелевой киральной жидкости Латинджера. Носители в этом странном одномерном металле имеют заряд $e/3$, унаследованный от объема, но физически существенно отличаются от объемных квазичастиц, и даже могут быть интерпретированы как совсем другое явление.

Теория дробного квантового эффекта Холла еще далека от своего завершения и сейчас, пожалуй, ясны только общие контуры этой новой теории. Возможно, что этот эффект есть первый случай экспериментального наблюдения квазичастиц с дробным электрическим зарядом. По крайней мере, именно такой ортодоксальной точки зрения придерживается Р. Лафлин. Прав Лафлин или нет - покажет будущее, но уже и сейчас совершенно ясно, что эти два эффекта положили конец представлениям о том, что фундаментальные открытия в физике связаны только с физикой высоких энергий, ускорителями и элементарными частицами. За последние двадцать лет XX века в физике твердого тела сделаны грандиозные открытия, в ряду которых обнаружение высокотемпературной сверхпроводимости, создание туннельного и атомного силового микроскопа, квантовый эффект Холла. Все это позволяет сказать, что передний край современной физики вновь переместился из области элементарных частиц в область физики конденсированных сред и что именно здесь, где тесно переплетены такие фундаментальные проблемы как существование частиц с дробным зарядом с чисто прикладными, например, созданием стандарта электрического сопротивления, можно ожидать новых открытий.

Глава 3. От ядерной физики до квантовых вычислений

3.1. Ядерно-физические методы в физике твердого тела. Две важнейших и наиболее интенсивно развивавшихся области физики – физика ядра и физика

твердого тела достаточно тесно пересекаются не только в области теории (приложение метода температурных функций Грина и других методов квантовой теории поля в физике конденсированного состояния, но и в области эксперимента: нейтронография и нейтронная оптика, отклонение и фокусировка пучков частиц кристаллами, каналирование, структурное излучение Черенкова-Вавилова, активационный анализ и гамма-активационный анализ. Основоположником использования ядерно-физических методов в физике твердого тела являлся выдающийся физик Нобелевский лауреат Энрико Ферми.

Энрико Ферми (29.09.1901 – 30.11.1954) выдающийся итаलो-американский физик. Родился в Риме. Он был младшим из трех детей железнодорожного служащего Альберте Ферми и урожденной Иды де Гаттис, учительницы. Еще в детстве Ферми обнаружил большие способности к математике и физике. Его выдающиеся познания в этих науках, приобретенные в основном в результате самообразования, позволили ему получить в 1918 году стипендию и поступить в Высшую нормальную школу при Пизанском университете. Уже через четыре года, в 1922 году, Ферми получил докторскую степень по физике с отличием за работу по экспериментальному исследованию рентгеновских лучей.

По возвращении в Рим Ферми получил от итальянского правительства стипендию, позволившую ему продолжать изучение современной физики в Германии, у Макса Борна, возглавлявшего в то время отделение теоретической физики Геттингенского университета, и в Голландии, у Пауля Эренфеста в Лейденском университете. Эренфест поддержал юного Ферми.

В 1924 году Ферми приступил к чтению лекций по математической физике и механике во Флорентийском университете. В первые годы его исследования затрагивали проблемы общей теории относительности Альберта Эйнштейна, статистической механики, квантовой теории и теории электронов в твердом теле. В 1926 году им была разработана новая разновидность статистической механики, подсказанная принципами запрета Вольфганга Паули. Она позволяла успешно описывать поведение электронов, а позднее была применена к протонам и нейтронам. Статистика Ферми позволила лучше понять электропроводность металлов и привела к построению более эффективной модели атома.

Когда в Римском университете в 1927 году была учреждена первая кафедра теоретической физики, Ферми, успевший обрести международный авторитет, был избран ее главой. В Риме Ферми сплотил вокруг себя несколько выдающихся ученых и основал первую в Италии школу современной физики. В международных научных кругах ее стали называть группой Ферми. Через два года Ферми был назначен Бенито Муссолини на почетную должность члена вновь созданной Королевской академии Италии. В начале 30-х годов Ферми перенес свое внимание с внешних электронов атома на атомное ядро. В 1933 году он предложил теорию бета-распада, позволившую объяснить, каким образом ядро спонтанно испускает

электроны и роль нейтрино-частиц, лишенных электрического заряда и не поддававшихся тогда экспериментальному обнаружению. Существование таких частиц было постулировано Паули, а название придумано Ферми. (Нейтрино было экспериментально обнаружено в 1956 году). Теория бета-распада Ферми включала новый тип сил, получивших название слабого взаимодействия. Такие силы действуют между нейтронами и протонами в ядре и обуславливают бета-распад. По интенсивности слабое взаимодействие значительно уступает сильному, удерживающему вместе нуклоны – частицы, из которых состоит ядро. Статья Ферми о бета-распаде была отвергнута из-за своей новизны английским журналом «Nature», но опубликована в итальянском и в немецком журналах. Опираясь на высказанные Ферми идеи, Хидеки Юкава предсказал в 1935 году существование новой элементарной частицы, известной ныне под названием пи-мезона, или пиона.

В 20-х годах было принято считать, что атом содержит два типа заряженных частиц: отрицательные электроны, которые обращаются вокруг ядра из положительных протонов. Физиков интересовало, может ли ядро содержать частицу, лишенную электрического заряда. Эксперименты по обнаружению электронейтральной частицы достигла кульминации в 1932 году, когда Джеймс Чедвик открыл нейтрон, в котором физики, в особенности Вернер Гейзенберг и Д.Д.Иваненко, почти сразу признали ядерного партнера протона. Ферми по достоинству оценил значение нейтрона как мощного средства иницирования ядерных реакций. Экспериментаторы пытались бомбардировать атомы заряженными частицами, но для преодоления электрического отталкивания заряженные частицы необходимо разгонять на мощных и дорогих ускорителях. Налетающие электроны отталкиваются атомными электронами, а протоны и альфа-частицы – ядром так, как отталкиваются одноименные электрические заряды. Поскольку нейтрон не имеет электрического заряда, необходимость в ускорителях отпадает.

Впоследствии Э.Ферми обнаружил явление замедления нейтронов и построил его теорию (Нобелевская премия по физике 1938 г.), а также открыл в 1936 году селективное поглощение нейтронов. Эти экспериментальные работы Э.Ферми с сотрудниками (Э.Амальди, Б.Понтекорво, Ф.Разетти, Э.Сегре) положили начало нейтронной физики. Одновременно Э.Ферми была высказана также идея о возникновении в результате облучения урана нейтронами новых заурановых элементов.

Значительный прогресс был достигнут в 1934 году, когда Фредерик Жолио и Ирен Жолио-Кюри открыли искусственную радиоактивность. Бомбардируя ядра бора и алюминия альфа-частицами, они впервые создали новые радиоактивные изотопы известных элементов. Продолжая начатую этими исследованиями работу, Ферми и его сотрудники в Риме принялись бомбардировать нейтронами каждый элемент периодической таблицы в надежде получить новые радиоактивные изотопы с помощью присоединения нейтронов к ядрам. Первого успеха удалось достичь при

бомбардировке фтора. Методически бомбардируя все более тяжелые элементы, Ферми и его группа получили сотни новых радиоактивных изотопов. При бомбардировке урана – 92-го элемента, самого тяжелого из встречающихся в природе, они получили сложную смесь изотопов. Химический анализ не обнаружил в ней ни изотопов урана, ни изотопов соседнего элемента (более того, результаты анализа исключали присутствие всех элементов с номерами от 86 до 91). Возникло подозрение, что экспериментаторам впервые удалось получить новый искусственный элемент с атомным номером 93. К неудовольствию Ферми, директор лаборатории Орсо Корбино, не дожидаясь контрольных анализов, объявил об успешном синтезе 93-го элемента. В действительности же Ферми не удалось его получить. Но он, сам того не зная, вызвал деление урана, расщепив тяжелое ядро на два или большее число осколков и других фрагментов. Деление урана было открыто в декабре 1938 года Отто Ганом и Фритцем Штрассманом, однако они также не поняли существа явления. Правильную его интерпретацию, как деления, дала в январе 1939 года Лизе Мейтнер, бывшая сотрудница Отто Гана.

В 1935 году, через несколько месяцев после начала экспериментов, Ферми и его сотрудники обнаружили, что если нейтроны замедлить, пропуская через воду и парафин, то они более эффективно иницируют ядерные реакции. Замедление нейтронов обусловлено их столкновениями с ядрами водорода (протонами), в больших количествах, содержащихся в этих средах. При столкновениях нейтронов и протонов значительная часть энергии нейтронов передается протону, так как массы этих частиц почти равны. Тем временем в Италии все большую силу набирала фашистская диктатура Муссолини. В 1935 году итальянская агрессия против Эфиопии привела к экономическим санкциям со стороны членов Лиги Наций, а в 1936 году Италия заключила союз с нацистской Германией. Группа Ферми в Римском университете начала распадаться. После принятия итальянским правительством в сентябре 1938 года антисемитских гражданских законов Ферми решил эмигрировать в США. По некоторым сведениям (Прим. Н.Д.) вопрос о месте эмиграции Ферми обсуждал с Бруно Понтекорво. И Ферми жребий (брошенная монета) указал на США, Понтекорво на СССР. Приняв приглашение Колумбийского университета занять должность профессора физики, Ферми информировал итальянские власти о том, что он уезжает в Америку на полгода.

В 1938 году Ферми была присуждена Нобелевская премия по физике. В решении Нобелевского комитета говорилось, что премия присуждена ему «за доказательства существования новых радиоактивных элементов, полученных при облучении нейтронами, и связанное с этим открытие ядерных реакций, вызываемых медленными нейтронами». «Наряду с выдающимися открытиями Ферми всеобщее признание получили его искусство экспериментатора, поразительная изобретательность и интуиция... позволившая пролить новый свет на структуру ядра и открыть новые горизонты для будущего развития атомных исследований», – заявил,

представляя лауреата, Ханс Плейель из Шведской королевской академии наук.

Во время церемонии вручения премии, состоявшейся в декабре 1938 года в Стокгольме, Ферми обменялся рукопожатием с королем Швеции, вместо того чтобы приветствовать того фашистским салютом, за что подвергся нападкам в итальянской печати. Сразу же после торжеств Ферми отправился за океан. По прибытии в Соединенные Штаты, Ферми, как и всем эмигрантам того времени, пришлось пройти тест на проверку умственных способностей. Нобелевского лауреата попросили сложить 15 и 27 и разделить 29 на 2.

Вскоре после того, как семейство Ферми высадилось в Нью-Йорке, в США из Копенгагена прибыл Нильс Бор, чтобы провести несколько месяцев в принстонском Институте фундаментальных исследований. Бор сообщил об открытии Ганом, Майтнер и Штрассманом расщепления урана при бомбардировке его нейтронами. Многие физики начали обсуждать возможность цепной реакции. Если всякий раз, когда нейтрон расщепляет атом урана, испускались новые нейтроны, то они могли бы, сталкиваясь с другими атомами урана, порождать новые нейтроны и тем самым вызвать незатухающую цепную реакцию. Так как при каждом делении урана высвобождается большое количество энергии, цепная реакция могла бы сопровождаться колоссальным ее выделением. Если бы удалось «взнуздать» цепную реакцию, то уран стал бы взрывчатым веществом неслыханной силы, с целью осуществить цепную реакцию Ферми приступил к планированию экспериментов, которые позволили бы определить, возможна ли такая реакция, и управляема ли она.

Первыми оценили опасность получения атомной бомбы нацистской Германией европейские ученые эмигранты, однако их обращения к правительственным чиновникам понимания не встречали. Так 16 марта 1938 года Директор научно-технического управления ВМС США адмирал С.С.Хупер получил письмо профессора Дж. Пеграма с просьбой встретиться с Нобелевским лауреатом Энрико Ферми по вопросам создания ядерного оружия. Хотя Хупер согласился встретиться с Ферми, однако убедить его в важности ядерных исследований не удалось, встреча оказалась безрезультатной. Тогда Ферми и Сциллард для давления на правительство США решили использовать авторитет физика №1 Альберта Эйнштейна. 2 августа 1939 года Лео Сциллард приехал к Эйнштейну и попросил его подписать письмо на имя президента Ф.Д.Рузвельта. Аргументы Сцилларда о серьезности положения произвели на Эйнштейна надлежащее впечатление, и он подписал письмо. Однако передать его президенту удалось лишь 11 октября 1939 года.

На переговорах с Управлением военно-морского флота в 1939 году Ферми впервые упомянул о возможности создания атомного оружия на основе цепной реакции с мощным выделением энергии. Он получил небольшое федеральное финансирование для продолжения своих исследований. В ходе работы Ферми и, бывший его студент, Эмилио Сегре установили

возможность использования в качестве взрывчатки для атомной бомбы тогда еще не открытого элемента плутония. Хотя плутоний, элемент с порядковым номером 94, еще не был известен, оба ученых были убеждены в том, что изотоп плутония с массовым числом 239 (^{239}Pu) должен расщепляться и может быть получен в урановом реакторе при захвате нейтрона ураном-238.

В 1942 году, когда в США был создан Манхэттенский проект для работ по созданию атомной бомбы, ответственность за исследование цепной реакции и получение плутония была возложена на Ферми, имевшего с юридической точки зрения статус «иностранца – подданного враждебной державы». На следующий год исследования были перенесены из Колумбийского в Чикагский университет, в котором Ферми как председатель подсекции теоретических аспектов Уранового комитета руководил созданием первого в мире ядерного реактора, который строился на площадке для игры в сквош под трибунами университетского стадиона Стэгг-Филд.

Воздвигаемый реактор на техническом жаргоне называли «кучей», так как он был сложен из брусков графита (чистого углерода), которые должны были сдерживать скорость цепной реакции (замедлять нейтроны). Уран и оксид урана размещались между графитовыми брусками. 2 декабря 1942 года кадмиевые регулирующие стержни, поглощающие нейтроны, были медленно выдвинуты, чтобы запустить первую в мире самоподдерживающуюся цепную реакцию. «Было ясно, – писал впоследствии Джон Кокрофт, – что Ферми открыл дверь в атомный век». Несколько позднее Ферми был назначен руководителем отдела современной физики в новой лаборатории, созданной под руководством Роберта Оппенгеймера для создания атомной бомбы в строго засекреченном местечке Лос-Аламосе (штат Нью-Мексико). Ферми и его семья стали гражданами Соединенных Штатов в июле 1944 г., а в следующем месяце они переехали в Лос-Аламос. Ферми был свидетелем первого взрыва атомной бомбы 16 июля 1945 года близ Аламогордо (штат Нью-Мексико). В августе 1945 года атомные бомбы были сброшены на японские города Хиросима и Нагасаки.

В конце войны Ферми вернулся в Чикагский университет, чтобы занять пост профессора физики и стать сотрудником вновь созданного при Чикагском университете Института ядерных исследований. Ферми был великолепным педагогом и славился как непревзойденный лектор. Среди его аспирантов можно назвать Марри Гелл-Манна, Янг Чжэньнина, Ли Цзундао и Оуэна Чемберлена. После завершения в 1945 году в Чикаго строительства циклотрона (ускорителя частиц) Ферми начал эксперименты по изучению взаимодействия между пи-мезонами и нейтронами. Ферми принадлежит также теория множественного рождения частиц, происхождения космических лучей и источники их высокой энергии.

В 1928 году Ферми вступил в брак с Лаурой Капон, принадлежавшей к известной в Риме еврейской семье. У супругов Ферми родились сын и дочь.

Человек выдающегося интеллекта и безграничной энергии, Ферми увлекался альпинизмом, зимними видами спорта и теннисом. Он умер от рака желудка у себя дома в Чикаго вскоре после того, как ему исполнилось пятьдесят три года. На следующий год в честь него новый, 100-й элемент был назван фермием. Его имя присвоено также крупнейшей ускорительной лаборатории США.

Ферми был избран членом Национальной академии наук США (1945), почетным членом Эдинбургского королевского общества (1949) и иностранным членом Лондонского королевского общества (1950). Президентом США Ферми был назначен членом Генерального консультативного комитета Комиссии по атомной энергии (1946-1950). Он был вице-президентом (1952) и президентом (1953) Американского физического общества. Помимо Нобелевской премии, Ферми был удостоен золотой медали Маттеуччи Национальной академии наук Италии (1926), медали Хьюза Лондонского королевского общества (1943), гражданской медали «За заслуги» правительства Соединенных Штатов Америки (1946), медали Франклина Франклиновского института (1947), золотой медали Барнарда за выдающиеся научные заслуги Колумбийского университета (1950) и первой премии Ферми, присужденной Комиссией по атомной энергии Соединенных Штатов Америки (1954). Он был почетным доктором многих высших учебных заведений, в том числе Вашингтонского и Йельского университетов, Рокфордского колледжа, Гарвардского и Рочестерского университетов. [45,48]

К основным ядерно-физическим методам обнаружения и определения содержания элементов в различных природных и техногенных материалах и объектах окружающей среды относится **активационный анализ**. Метод базируется на фундаментальных понятиях и данных о структуре атомных ядер, сечениях ядерных реакций, схемах и вероятностях распада радионуклидов, энергиях излучения, а также на современных способах разделения и предварительного концентрирования микроэлементов. Широкое распространение активационный анализ получил благодаря таким преимуществам перед другими методами, как низкие пределы обнаружения элементов (10^{-12} – 10^{-13} г), экспрессность и воспроизводимость анализа, возможность неразрушающего одновременного определения в пробе 20 и более элементов. Применение специальных химических методик и аппаратных приемов позволяет определять фоновое содержание металлов в приземном слое атмосферы, следовые количества примесей в биологических объектах, особо чистых веществах и устанавливать химическую форму элементов в исследуемых пробах. Большое значение имеет возможность проведения анализа в диапазоне массы образцов от нескольких микрограммов (важно для труднодоступных образцов, например, метеоритов или лунного грунта) до нескольких сотен граммов. Следует отметить, что относительная погрешность определения содержания элементов в пробах активационным методом не выходит за пределы 10%, а воспроизводимость составляет 5–15% и может быть доведена до 0,1–0,5%

при серийных анализах. В настоящее время имеется целый ряд разновидностей активационного анализа. Однако общим для всех этих методов является активация вещества нейтронами, гамма-квантами или заряженными частицами и последующая регистрация спектрального состава излучения возбужденных ядер или образовавшихся радиоактивных изотопов. Наиболее распространены первые два метода. Активационный анализ на заряженных частицах, в связи с их малым пробегом в веществе, используется главным образом для анализа тонких слоев и при изучении поверхностных эффектов.

Для осуществления активационного анализа исследуемый образец (проба) подвергается облучению потоком бомбардирующих частиц, например нейтронов в ядерном реакторе. При этом образуются как стабильные, так и радиоактивные нуклиды (радионуклиды), характеризующиеся различными временами жизни и энергиями распада. Радиоактивность облученного образца прямо пропорциональна количеству образовавшихся радионуклидов. Поэтому количество радионуклида удобно выражать его активностью A , т. е. числом распадов в единицу времени, т.к. эту величину можно измерить с помощью различных детекторов.

В результате распада количество радиоактивных ядер в образце непрерывно уменьшается и, следовательно, изменяется и активность. Скорость распада описывается дифференциальным уравнением, решение которого имеет экспоненциальный вид, так что нетрудно получить уравнение для вычисления активности радионуклида:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

Зная активность радионуклида A , содержащегося в образце на данный момент времени, можно рассчитать количество радиоактивных ядер и их массу

$$m = \frac{A}{\lambda} \quad (2)$$

где m — масса радиоактивных ядер (г), M — массовое число радиоизотопа. Скорость накопления радионуклида во время облучения исследуемой пробы можно описать дифференциальным уравнением:

$$\frac{dN_x}{dt} = \sigma \Phi N_x - \lambda N_x \quad (3)$$

где $\sigma \Phi N_x$ — скорость образования радиоактивных ядер в пробе, λN_x — скорость их распада, Φ — плотность потока бомбардирующих частиц ($\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$), σ — сечение реакции (см^2), N_x — количество стабильного изотопа анализируемого элемента в облучаемой пробе.

Интегрируя уравнение (3), получим выражение для вычисления активности радионуклида, накопившегося в пробе за время облучения,

$$\dots, \quad (4)$$

где N — количество накопившихся радиоактивных ядер; $t_{\text{обл}}$ — время облучения.

Если время облучения намного больше периода полураспада $t_{\text{обл}} \gg (8-10)T_{1/2}$, то экспоненциальное слагаемое в (4) пренебрежимо мал по сравнению с единицей, и тогда

$$\dots. \quad (5)$$

Активность \dots называется активностью насыщения или равновесной активностью.

Обычно после облучения какое-то время затрачивается на транспортировку пробы к установке детектирования, или проба специально выдерживается для распада мешающих анализу, более короткоживущих продуктов ядерных реакций. В результате распада активности определяемых радионуклидов тоже уменьшается в соответствии с выражением (1):

$$\dots, \quad (6)$$

где $A_{\text{выд}}$ — активность определяемого нуклида после выдержки; $t_{\text{выд}}$ — время между концом облучения и началом измерения активности.

Вывод уравнения (4) сделан без учета уменьшения количества («выгорания») исследуемых стабильных ядер N_x в пробе при облучении, поскольку «выгорание» незначительно и заметно только для изотопов с большим сечением взаимодействия и при длительном облучении. Было также предположено, что плотность потока активирующих частиц во время облучения не меняется.

Ежегодно в мире проводится более сотни тысяч активационных анализов. В качестве примера можно упомянуть нейтронно-активационный анализ волос Исаака Ньютона, который был проведен в английском ядерном центре в Олдермастоне. Для исследования на присутствие золота и ртути облучение нейтронами продолжалось 5 дней, а на мышьяк, сурьму и серебро - до 14 дней. Оказалось, что содержание металлов с высокой токсичностью значительно превышало нормальный уровень, так количество ртути в волосах Ньютона в 40 раз превосходило норму. Полученные данные подтверждают предположение о том, что Ньютон в течение длительного времени болел вследствие ртутного отравления.

Инструментальный и радиохимический анализ. Облучение исследуемых проб приводит к образованию смеси радионуклидов различных химических

элементов, входящих в пробу. Идентификацию отдельных радионуклидов осуществляют либо по их ядерно-физическим свойствам (энергия и вид испускаемых частиц, период полураспада), применяя для этих целей счетчики гамма-квантов и β -частиц и гамма-спектрометры, либо измеряя активность радионуклида в течение какого-то времени для установления его периода полураспада. Данные об интенсивности отдельных видов излучения, принадлежность которых установлена, используют для расчета содержания элементов в исследуемой пробе. На Рис.1 показан пример определения элементного состава образца по спектрам гамма-излучения ядер примеси.

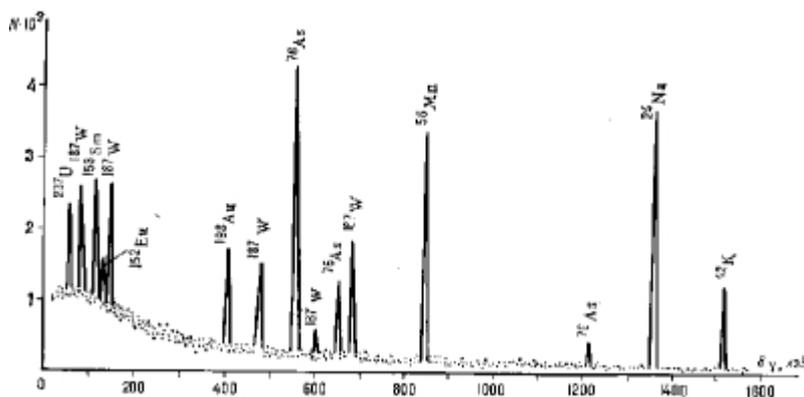


Рис.1.Определение элементного состава образца по спектрам гамма-излучения.

Количество зарегистрированных в процессе анализа импульсов с учетом уменьшения активности во время измерения выражается следующим соотношением:

$$\Delta A = \frac{m_x \cdot Y \cdot v \cdot \epsilon}{t_{изм}} \quad (7)$$

где m_x — масса определяемого элемента в пробе, Y — относительная распространенность изотопа, v — квантовый выход излучения, ϵ — эффективность регистрации излучения данного вида, $t_{изм}$ — время измерения.

Если период полураспада радионуклида достаточно велик, т.е. $t_{изм} \ll T_{1/2}$ то выражение (7) принимает вид:

$$\Delta A = m_x \cdot Y \cdot v \cdot \epsilon \quad (8)$$

Используя выражения (7) или (8), по измеренным значениям ΔA вычисляют содержание исследуемого элемента m_x в пробе. Заметим, что из последнего уравнения (8) следует, что с увеличением периода полураспада уменьшается число полезных зарегистрированных сигналов. Следовательно, экспрессность анализа будет выше при анализе проб по короткоживущим

радионуклидам.

Приведенный метод определения содержания элемента по активности накопившегося радионуклида без привлечения эталона называется абсолютным методом. Однако в этом случае необходимо знать плотность потока и энергию бомбардирующих частиц. Например, при облучении проб реакторными нейтронами требуются данные о плотности потока и энергетическом спектре нейтронов, а также информация о величинах резонансных интегралов для облучаемых нуклидов, поскольку одни нуклиды (например, ^{23}Na , ^{45}Sc , ^{58}Fe , ^{139}La) преимущественно активируются тепловыми нейтронами, а другие (^{75}As , ^{87}Br , $^{121,123}\text{Sb}$, ^{181}Ta , ^{197}Au , $^{113,115}\text{In}$) и тепловыми, и резонансными нейтронами. Важным требованием в абсолютном методе является соблюдение постоянства потока активирующего излучения во времени. Необходимо также обеспечить измерение абсолютной активности накопившегося радионуклида с достаточной точностью.

Указанные выше трудности отсутствуют в относительном методе, при котором одновременно с анализируемой пробой облучается эталон с точно известным количеством определяемого элемента. Наведенные активности эталона и пробы измеряют в одинаковых условиях, а содержание определяемого элемента вычисляют из соотношения

$\frac{m_x}{m_0} = \frac{A_x}{A_0}$, где m_x и m_0 — масса элемента в пробе и эталоне; A_x и A_0 — активность пробы и эталона, соответственно.

Такое исследование без разрушения образцов называют инструментальным активационным анализом. Если же при облучении пробы получается сложная смесь радионуклидов и ее невозможно расшифровать из-за совпадения или наложения близких по энергии гамма-квантов, то облученную пробу растворяют, проводят радиохимически чистое выделение отдельных элементов или группы элементов и затем по измеренной активности радионуклидов рассчитывают содержание элементов. Такой вариант называется активационным анализом с радиохимическим разделением.

Наряду с известными методами активационного анализа, к настоящему времени разработан ряд новых вариантов, в которых сочетаются техника активационного анализа и метод изотопного разбавления. Например, в безэталонном варианте с использованием субстехиометрии облученный образец растворяют, разделяют на две равные части m_{x1} и m_{x2} . Далее к части m_{x1} добавляют известное количество стабильного носителя m_0 и затем из обеих частей $m_{x1} + m_0$ и m_{x2} выделяют одинаковые, субстехиометрические (меньшие стехиометрических) количества определяемого элемента δm , измеряют радиоактивность этих аликвот и вычисляют неизвестное содержание определяемого элемента:

$\frac{m_x}{m_0} = \frac{A_x}{A_0}$. Так как $m_x = m_{x1} + m_{x2}$ и $m_{x1} = m_{x2}$, то

$\frac{m_x}{m_0} = \frac{A_x}{A_0}$

где A — активность радионуклида в пробе; A_{x1} и A_{x2} — активность аликвот, взятых из первой и второй половин раствора пробы соответственно; m_x — неизвестная масса определяемого элемента в пробе. В этом методе использовано уменьшение удельной активности первой половины раствора из-за добавки стабильного носителя m_0 .

Важным параметром любого метода анализа является предел обнаружения, определяемый как наименьшая концентрация, при которой исчезает аналитический сигнал. Однако, для однозначной идентификации и тем более для количественного определения этот сигнал и, следовательно, концентрация должны иметь значительно (примерно на порядок) большую величину. Поэтому для оценки аналитических методов введена такая характеристика, как предел определения — минимальная концентрация, измеряемая с заданной погрешностью. Минимальная концентрация в активационном анализе зависит от минимальной активности, которая может быть измерена с заданной погрешностью. Подставив величину этой минимальной активности в уравнение (5), можно рассчитать минимальное количество вещества, доступное для определения при заданных условиях. Из соотношения (7) следует, что минимальная определяемая концентрация элемента в пробе будет тем ниже, чем больше сечение реакции и относительная распространенность активируемого изотопа и меньше период полураспада образующегося при облучении радионуклида.

Принято считать, что при количественном анализе радиоактивности необходимо регистрировать измерительным устройством не менее 18 имп/мин над фоном. Тогда при эффективности детектора 0,05 можно наблюдать минимальную активность $A_{\text{мин}}$, соответствующую 6 Бк. Если активация продолжается до получения активности насыщения, а время выдержки и измерения достаточно малы, то минимальное количество определяемого элемента в одном грамме анализируемой пробы, в соответствии с выражением (7), будет следующим:



где $m_{x\text{мин}}$ — минимальная масса определяемого элемента в одном грамме пробы, $A_{\text{мин}} = 6$ Бк — минимальная наведенная активность определяемого элемента, поддающаяся измерению.

Нейтронно-активационный анализ. Ядра атомов большинства элементов легко поглощают нейтроны, особенно если скорость последних не очень велика. Это свойство атомных ядер и лежит в основе нейтронно-активационного анализа. В результате поглощения нейтронов ядрами чаще всего испускаются мгновенные гамма-лучи, поэтому такую ядерную реакцию называют радиационным захватом нейтронов и обозначают через (n, γ) . Радиационный захват нейтронов приводит, как правило, к образованию радиоактивных ядер. Иначе говоря, увеличение числа нейтронов в ядре на

единицу делает его нестабильным. Так при поглощении нейтронов ядрами золота ^{197}Au в реакции $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ возникает радиоактивный изотоп золота ^{198}Au с периодом полураспада 2,7 дня.

Количество данного радиоактивного изотопа, образующегося в веществе при облучении нейтронами, прямо пропорционально количеству его стабильного предшественника и, следовательно, служит мерой содержания элемента в анализируемом объеме. Например, чем выше концентрация примесного золота, тем больше возникает радиоактивных ядер ^{198}Au .

Активация нейтронами ведет преимущественно к появлению бета-активных ядер. В результате бета-распада дочернее ядро может оказаться не только в основном, но в возбужденном состоянии.

Важно, что каждый сорт радиоактивных ядер характеризуется собственной энергией гамма-излучения, сопутствующего бета-распаду. Это обеспечивает возможность избирательного определения одного или нескольких элементов. Обычно регистрируют гамма-лучи объектов, активированных нейтронами, в широком диапазоне энергий, вследствие чего получаемый гамма-спектр содержит информацию о концентрации целого ряда химических элементов.

Чувствительность нейтронно-активационного анализа непосредственно связана с величиной потока нейтронов, облучающих исследуемый объект (см. формулы (4) – (6)). В современном нейтронно-активационном анализе используются очень интенсивные потоки нейтронов, плотность которых достигает 10^{14} нейтронов на квадратный сантиметр в секунду. Это гарантирует высокую чувствительность метода: содержания многих элементов могут быть измерены с точностью до 10^{-9} грамм.

Высокая чувствительность позволяет анализировать с помощью нейтронов крайне малые образцы. Так, при изучении мономинеральных фракций лунных пород использовались образцы массой в несколько микрограмм. В то же время нейтронно-активационный анализ может проводиться без разрушения образца, что особенно ценно при исследовании уникальных объектов.

По сравнению с другими аналитическими методами в нейтронно-активационном анализе намного меньшее влияние так называемого «матричного эффекта». Это означает, что на определение примесных элементов практически не сказываются микроэлементы, составляющие основу вещества. Иными словами, нейтронно-активационному методу доступно измерение содержания микроэлементов в самых разнообразных материалах.

Гамма-активационный анализ основан на ядерных реакциях, при которых жесткие фотоны возбуждают реакции с выходом нейтронов и протонов. Среди большого числа методов элементного анализа гамма-активационный анализ выделяется большой селективностью и чувствительностью. Фотоядерные реакции позволяют активировать практически все элементы периодической системы с пределом обнаружения до $10^{-7}\%$. Для гамма-активационного анализа используется тормозное излучение высокой интенсивности ($10^{13} - 10^{15}$ квант/с), которое получают на

электронных ускорителях. В качестве источника фотонов в настоящее время используется тормозное излучение электронов с энергиями 10—30 МэВ. Важной характеристикой источника фотонов, определяющей эффективность гамма-активационного анализа, является спектральная яркость излучения. Гамма-активационный анализ, в частности, позволяет эффективно анализировать такие элементы, как Ca, Ni, Ti, Tl и Pb. Преимуществом гамма-активационного анализа перед нейтронно-активационным анализом является также то, что гамма-кванты могут глубже проникать в образец, следовательно, анализу могут подвергаться образцы больших размеров.

Нейтроннография. Несмотря на большой прогресс в развитии техники, к настоящему времени не создано достаточно надежных и эффективных приборов, позволяющих непосредственно наблюдать расположение отдельных атомов в кристаллической решетке или в молекулах. Самые совершенные электронные микроскопы позволяют наблюдать только очень крупные атомы, например урана или золота, расположенные вблизи более мелких. Наиболее распространенные электронные микроскопы позволяют наблюдать неоднородности с размерами в несколько атомов. Ионные микроскопы (проекторы) хотя и позволяют наблюдать расположение отдельных крупных атомов, но очень сложны в использовании. Точное определение расстояний между атомами или кристаллическими плоскостями этим методом крайне затруднительно. Сегодня самым эффективным методом изучения взаимного расположения атомов является дифракция микрочастиц: фотонов, электронов, нейтронов. Именно этими методами в основном получены данные о структуре кристаллов и молекул. При исследовании кристалла дифракционными методами на кристалл направляют почти параллельный пучок частиц, изучают распределение интенсивности дифракции этих частиц по разным направлениям (а иногда и при различных ориентациях кристалла), а затем по дифракционной картине делают выводы о типе элементарной ячейки кристалла и строении его базиса. Эти методы позволяют определять периоды кристаллической решетки с точностью до 4-5 знака и определять с точностью до 2-3 знака расположение атомов в базисе. Для наблюдения дифракции необходимо, чтобы длина волны де-Бройля дифрагирующих частиц была соизмерима с периодом кристаллической решетки. Этому условию удовлетворяют фотоны при энергии $E = 5-20$ кэВ (рентгеновское и гамма-излучение), электроны при $E = 10-100$ эВ, и нейтроны при $E = 0,01-0,1$ эВ (тепловые нейтроны). Именно эти три частицы наиболее часто используются в дифракционных исследованиях кристаллов. Однако дифракция нейтронов на кристаллической решетке обладает существенным отличием от дифракции, например, рентгеновского излучения. Это отличие обусловлено главным образом разной природой рассеивающих центров. Если электромагнитные волны рассеиваются электронными оболочками атомов, то нейтроны, не имеющие заряда, рассеиваются ядрами. Это приводит, во-первых, к тому, что дифракция

нейтронов слабо зависит от атомного номера кристалла, а во-вторых, дифракция может иметь особенности, связанные с наличием изотопов в исследуемом образце. Кроме того, наличие магнитного момента у нейтрона делает возможным исследование магнитной структуры исследуемых образцов. Значительный вклад в развитие нейтронографии, равно, как и других ядернофизических методов применительно к физике твердого тела внесли Нобелевские лауреаты 1994 года Бертрам Брокхауз и Клиффорд Шалл.

Клиффорд Гленвуд Шалл (*англ.* Clifford Glenwood Shull, *23 сентября 1915, Питтсбург, Пенсильвания, США — 31 марта 2001, Медфорд, Массачусетс, США*) — американский физик, лауреат Нобелевской премии по физике в 1994 году (совместно с Бертрамом Брокхаузом) «за создание метода нейтронной дифракции».

Клиффорд Шалл родился в семье Дэвида и Дэйзи Шалл в районе Питтсбурга под названием Гленвуд (в честь которого получил своё второе имя), в штате Пенсильвания. Интерес к физике, как к возможной профессии в будущем, Шалл проявил на последнем году обучения в школе Шенли (*англ.* Shenley High School), где он проходил курс физики у Поля Дюсарта. После школы Шалл поступил в Технологический институт Карнеги (*англ.* Carnegie Institute of Technology, сейчас — Университет Карнеги—Меллон), где слушал лекции по физике Гарри Хауэра, декана физического факультета, которые оказали на него сильное впечатление и еще более убедили в выборе дальнейшей профессии.

В январе 1934 года неожиданно умирает отец Шалла, что приводит к кризису в семье. Старший брат Клиффорда Перри Лео, недавно закончивший школу по художественной специальности, вынужден отказаться от идеи дальнейшего обучения и заняться отцовским бизнесом. Это продолжалось до конца обучения Клиффорда в институте в 1937 году. После обучения Шалл получает приглашение присоединиться к одной из исследовательских групп на факультете физики в Нью-Йоркском университете, занимающейся проблемами ядерной физики. Руководителями группы были Фрэнк Майерс (*англ.* Frank Myers) и Роберт Хантун (*англ.* Robert Huntoon), которые на тот момент работали над созданием генератора Кокрофт-Уолтона для ускорения дейтронов мощностью 200 кэВ. Шалл участвовал в первых испытаниях созданного ускорителя (опыты в области D-D-реакций).

В первом году своего пребывания в Нью-Йорке Шалл знакомится с Мартой-Нуэль Саммер, которая позднее становится его женой.

Во время обучения Шалла на третьем курсе, на факультете принимается решение о поддержке создания генератора Ван дер Граафа для ускорения электронов мощностью 400 кэВ. Создание ускорителя представлялось на тот момент важной задачей, поскольку помогло бы доказать существование у электронов спина или поляризации (предыдущие попытки в этом направлении были неудачными). В качестве ассистента Фрэнка Майерса, Шалл помогает в создании генератора, который впоследствии использует для проведения опытов по двойному рассеянию электронов для своей

диссертационной работы. В июне 1941 года Шалл получает степень доктора наук.

В июле того же года Шалл переезжает с семьей в Бикон, Нью-Йорк, где до 1946 года работает в исследовательской лаборатории «Техасской компании» (англ. *The Texas Company*). Там он занимается изучением микроструктуры катализаторов с использованием газовой адсорбции, дифракции рентгеновского излучения и рассеяния. С вступлением США во Вторую мировую войну в декабре 1941 года эта область исследований приобрела особо важное значение, поскольку получаемые в лаборатории катализаторы использовались при изготовлении высокопроизводительного авиационного топлива. В это же время Шалл начинает интересоваться Манхэттенским проектом, в который были вовлечены многие крупные учёные-физики того времени. Его переходу туда препятствует руководство Техасской компании и Шалл вынужден оставаться в Биконе до конца войны.

После окончания войны Шалл возобновляет свои попытки по присоединению к Манхэттенскому проекту и на этот раз удачно. В июне 1946 года он вместе с семьей переезжает в Теннесси для работы в Национальной лаборатории Оук-Ридж. В Оук-Ридже Шалл работает вместе с Эрнестом Волланом (англ. *Ernest Wollan*), сконструировавшим элементарный двухосевой спектрометр для получения нейтронных дифракционных картин кристаллов и других материалов. За исследования в области нейтронной дифракции, проводившиеся в этой лаборатории, Шалл в 1994 году получит Нобелевскую премию по физике. Воллану разделить эту премию с Шаллом и Брокхаузом помешает его смерть в 1984 году.

В Оук-Риджской лаборатории Шалл работает до 1955 года, после чего переходит в Массачусетский технологический институт. Там он занимается обучением студентов на исследовательском реакторе MITR-I. На основе данных о нейтронной радиации, получавшейся в данном реакторе, группа Шалла проводила исследования в различных областях, включая намагниченность в кристаллах, технологию получения поляризованного излучения, динамическое рассеяние в идеальных кристаллах, интерферометрию и фундаментальные свойства нейтрона.

В 1986 году Шалл отошёл от научной и преподавательской деятельности. Он скончался 31 марта 2001 года, в возрасте 85 лет, в Мемориальном госпитале Лоуренса в Медфорде после скоротечной болезни. У Шалла трое сыновей — Джон, Роберт и Уильям.

Бертрам Невилл Брокхауз (англ. *Bertram Brockhouse* 15 июля 1918, Летбридж, Канада — 13 октября 2003, Гамильтон, Канада) — канадский физик, лауреат Нобелевской премии по физике в 1994 г. «за создание нейтронной спектроскопии» (совместно с Клиффордом Шаллом).

Бертрам Брокхауз был вторым из четырёх детей в семье Израэля Бертрама и Мэйбл Эмили Брокхауз (ур. Невилл). В конце 1926 г. семья переехала в Ванкувер, где в 1935 г. Бертрам Брокхауз окончил школу им. Короля Георга. Вскоре после этого семья, по причине бедности во время депрессии, переехала в Чикаго, где Брокхауз работал ассистентом в лаборатории и занимался

починкой радиоприёмников. Так как ситуация в семье после переезда в Чикаго не улучшилась, в 1938 г. последовал новый переезд обратно в Ванкувер. После начала второй мировой войны Брокхауз пошёл добровольцем на флот и служил там до окончания войны. На службе занимался в основном эксплуатацией оборудования ASDIC — предшественника сонаров.

После окончания войны он поступает в конце 1945 г. при помощи департамента поддержки ветеранов в университет британской Колумбии. Изучает физику и математику. В 1947 г. получил степень бакалавра в лаборатории низких температур. После этого он переводится в университет Торонто и через 8 месяцев получает там степень магистра. После защиты диссертации в 1950 г. получает место в лаборатории Чок Ривер — канадскому учреждению по ядерной энергии. С 1960 г. возглавляет там отделение нейтронной физики.

В 1962 г. Брокхауз стал профессором в университете Мак-Мастера в Канаде, где и оставался до пенсии в 1984 г.

В 1994 г. удостоен, совместно с Клиффордом Шаллом, Нобелевской премии по физике. В 1982 г. присвоено звание кавалера ордена Канады и в 1995 г. посвящён в компаньоны.

В октябре 2005 г. в рамках празднования 75-летия университета Мак-Мастера, Университетская авеню в городе Гамильтоне переименована в честь Брокхауза в Брокхауз-уэй [48].

Структурная нейтронография уже давно заняла прочные позиции в ряду других методов изучения кристаллической структуры. Появление в последние годы высоко поточных атомных реакторов, автоматических нейтронных дифрактометров, управляемых ЭВМ, а также комплексов специальных компьютерных программ обработки нейтроно-дифракционных данных необычайно расширило возможности структурной нейтронографии и обусловило резкое возрастание интереса к ней со стороны физиков, химиков, биологов, металлургов. Структурная нейтронография – это метод изучения строения молекул, кристаллов и жидкостей с помощью рассеяния нейтронов. Сведения об атомной и магнитной структуре кристаллов получают из экспериментов по дифракции нейтронов, о тепловых колебаниях атомов в молекулах и кристаллах — из экспериментов по рассеянию нейтронов, при котором нейтроны обмениваются энергией с изучаемым объектом (рассеяние в этом случае называется неупругим). Первые работы в области нейтронографии принадлежат Ферми (1946).

Структурная нейтронография - один из современных методов структурного анализа кристаллов. Геометрическая теория дифракции всех трёх излучений - рентгеновских лучей, электронов, нейтронов - одинакова, но физическая природа взаимодействия их с веществом различна, что определяет специфику и области применения каждого из методов. Как уже указывалось выше, рентгеновские лучи рассеиваются электронными оболочками атомов, нейтроны (через короткодействующие ядерные силы) - атомными ядрами, электроны - электрическим потенциалом атомов. Вследствие этого

структурная нейтронография имеет ряд особенностей. Рассеивающая способность атомов характеризуется атомной амплитудой рассеяния. Особый характер взаимодействия нейтронов с ядрами приводит к тому, что атомная амплитуда рассеяния нейтронов для различных элементов (в отличие от рентгеновских лучей) несистематическим образом зависит от порядкового номера элемента в периодической системе. В частности, рассеивающие способности лёгких и тяжёлых элементов оказываются одного порядка. Поэтому изучение атомной структуры соединений лёгких элементов с тяжёлыми является специфической областью структурной нейтронографии. Прежде всего, это относится к соединениям, содержащим легчайший элемент - водород. Рентгенографически и электронографически в некоторых благоприятных случаях удаётся определить положение атомов водорода в кристаллах его соединений с другими лёгкими атомами ($Z < 30$). Нейтронографически определение положения атомов водорода не сложнее, чем большинства других элементов, причём существенная методическая выгода достигается заменой в изучаемой молекуле атомов водорода на его изотоп — дейтерий. С помощью нейтронографии определена структура большого числа органических соединений, гидридов и кристаллогидратов, уточнена структура различных модификаций льда, водородсодержащих сегнетоэлектриков и т.д., что дало ряд новых данных для развития кристаллохимии водорода.

Внимание к исследованиям электромагнитных процессов в кристаллах с участием быстрых заряженных частиц обусловлено предсказанием и обнаружением ряда неизвестных ранее физических эффектов, которые открыли новые возможности не только в изучении фундаментальных закономерностей взаимодействия релятивистских частиц с веществом, но и в области прикладной ядерной физики для получения интенсивных пучков фотонов высокой энергии, управления параметрами пучков релятивистских частиц, исследования свойств кристаллов и т.д. Электромагнитные процессы, сопровождающие прохождение быстрых заряженных частиц через различные среды, достаточно многообразны и их исследование еще далеко не завершено. К таким эффектам относятся когерентные и интерференционные эффекты в излучении, явление каналирования и связанное с ним спонтанное электромагнитное излучение, ориентационные эффекты в рассеянии быстрых заряженных частиц в кристаллах. История открытия и изучения многих из них насчитывает уже не один десяток лет и к настоящему времени накоплен большой теоретический и экспериментальный материал в этой области физики. Дальнейшие исследования в этой области, особенно при сверхвысоких энергиях частиц, несомненно, помогут найти ответы на многие вопросы современной квантовой электродинамики и дадут ключ к созданию новых технологий в экспериментальной и прикладной физике.

Хорошо известно, например, что электромагнитное излучение может происходить при ускорении частицы, при распространении частицы в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость электромагнитных волн, или при перестройке собственного поля частицы вследствие изменения

диэлектрической восприимчивости среды. Эти причины порождают многообразие различных типов электромагнитного излучения, которые служат либо для определения характеристик самих излучающих частиц, либо используются как инструмент для других физических исследований.

Поиск новых источников интенсивного электромагнитного излучения в разных диапазонах частот постоянно способствует развитию теоретических и экспериментальных исследований различных типов электромагнитного излучения релятивистских частиц в веществе и во внешних полях. Например, вопросы физики γ - γ реакций попадают в сферу все большего внимания, как теоретиков, так и экспериментаторов. Эта область физики является интенсивно развивающейся. В этой связи развитие экспериментальных методов получения интенсивных потоков фотонов высоких энергий (более 100 ГэВ) значительно расширило бы круг исследований электрослабых и сильных взаимодействий. Поэтому решение проблемы источника фотонов высоких энергий является определяющей для дальнейшего прогресса исследований в этой области.

В последние годы был открыт целый ряд, так называемых, ориентационных эффектов, возникающих при прохождении быстрых заряженных частиц через кристаллы. Эти эффекты уже нашли широкое применение в радиационной физике твердого тела, ядерной физике, физике сверхтонких взаимодействий и т.п. Существующая со времен Бора теория прохождения заряженных частиц через вещество не может быть использована для интерпретации этих эффектов, так как в этой теории не учитывается периодическая структура кристаллов (а именно из-за периодичности решетки и возникают ориентационные эффекты).

3.2. Волокно и фотоаппарат

В 2009 году Нобелевскую премию по физике получили ученые, изменившие мир. Причем сделавшие это почти на бытовом уровне – их изобретения позволили расцвести высокоскоростному Интернету, цифровой фотографии, а также превратили астрономию в одну из самых красивых наук, подарив ей возможность делать великолепные снимки. Чарльз Као удостоился половины Нобелевской премии в 975 тысяч евро за свои работы по созданию оптоволоконных сетей передачи данных.

*Американский физик китайского происхождения **Чарльз Куэн Као** родился 4 ноября 1933 года в Шанхае. С давних времен семья Као считалась зажиточной, так как прежние поколения были умелыми земледельцами. Дети каждого поколения получали хорошее образование. Не стал исключением и Чарльз. С раннего детства он и его младший брат Тимоти изучали китайскую классику. Всячески способствовал этому дед Чарльза - Гао Чуйвань. Дед был поэтом и сочинял прекрасные стихи, которые записывал традиционным каллиграфическим методом. Дед также коллекционировал книги и был членом революционной организации Нан Ше, которая принимала участие в Синьхайской революции 1911 года.*

Из-за утраты двух старших братьев, Чарлз и Тимоти росли очень избалованными, но под постоянной опекой нянь. Обучение мальчиков происходило на дому. Приходили два учителя, один преподавал "столбы" конфуцианства и заставлял цитировать заученные строки наизусть, другой преподавал английский язык. В десять лет Чарлз был отдан в школу. Первый день для него был шокирующим: он еще никогда не видал столько кричащих и бегущих детей. Школа, в которой учился Чарлз, была многонациональной. Способствовало этому то, что дом семьи Као находился во французском сеттльменте. Благодаря такому стечению обстоятельств семья практически не пострадала от ужасов японской оккупации. Поэтому большую часть свободного времени семья Као проводила за бриджем и другими карточными играми. С окончанием войны с Японией проблемы не окончились, на территории Китая начала заправлять Красная Армия. Нередко в доме возникали дискуссии о выезде из Китая. В 1948 году семья покинула Шанхай. Ненадолго пробив на Тайване, они обосновались в Гонконге. С помощью родственников матери, они сразу нашли уютную квартиру, а Чарлз с братом были зачислены в колледж Святого Джозефа, где учились их двоюродные братья. В колледже Чарлзу пригодилось знание английского языка, поскольку на нем велось обучение. Аттестат зрелости он получил в 1952 году. Позже Чарлз скажет, что одноклассники запомнили его как исключительного тихоню, поскольку он никогда не интересовался спортом, практически ни с кем не разговаривал, а занимался только учебой. После получения среднего образования, Чарлз хотел продолжить обучение в Гонконгском университете. Но после войны это учебное заведение не могло дать тот уровень знаний, который ему был нужен. Чарлз хотел изучать электротехнику, и поэтому обратился в Британское посольство в способствовании его выезду в Великобританию. Помощь была оказана и в 1953 году он на лайнере "P&O" отправился в Англию.

В Лондоне он поступил в Политехнический университет Вулвич (который позже был преобразован в Гринвичский университет). В 1957 он получает степень бакалавра по электротехнике. После окончания университета он устроился на работу в Standard Telephones & Cables (STC), британскому филиалу американской International Telephone & Telegraph (ITT). Около года он работал как стажер. Ему понравилось, и он остался еще на 2 года. В течение трех лет пребывания в STC он встретил свою будущую жену Гвен, которая работала в той же фирме этажом выше. После этого, чувствуя, что нужно двигаться дальше, Као устраивается в Политехнический университет Лафборо.

Однажды высшее руководство STC получило отчеты об исследованиях Као и незамедлительно предложило должность в научно-исследовательской лаборатории, которая находилась в Харлоу. Дабы дать дополнительный стимул, в Харлоу сразу нашлась работа для жены Чарлза. Университет не хотел мирно отпустить Чарлза, так как он с женой взял ипотеку под поручительство учебного заведения. Но к счастью, адвокаты STC быстро

решили все проблемы. После этого судьба на 30 лет связала Као с STC. В 1965-ом Чарлз получил степень доктора философии в Имперском колледже Лондона. В 1966 году Као совместно с Джорджем Хокхэмом совершает новаторское открытие, из которого следует, что высокие потери в передаче данных по волокну вызваны не самой технологией, а примесями в стекле. Результаты своих исследований он представляет в том же году. Позже выходит его отчёт с изложением ключевых особенностей волоконно-оптических телекоммуникационных технологий. Изложенные в этом документе идеи по использованию волокна для потребностей связи являются основой телекоммуникаций сегодняшнего дня.

В то время стандартный уровень затухания сигнала составлял 100 дБ/км. Оптоволокно имело ограниченную сферу применения, например, использовалось в медицине для передачи изображения из желудка пациента. В своем отчете Чарлз обосновывает, что можно уменьшить затухание до 20 дБ/км, то есть дальность передачи можно довести до 100 км, если увеличить прозрачность стекла. Это был невероятный прорыв, ибо никто раньше предположить не мог, что такое теоретически возможно. Работа Као была первой на эту тему, и породила целую волну научных изысканий от других исследователей. В 1971 году американская компания Corning Glass Works изготовила первый километровый образец оптоволокна из плавленого кварца. Новый материал позволил уменьшить затухание до 17 дБ/км, а добавка диоксида германия снизила его до 4 дБ/км. В наше время лучшие образцы оптоволокна имеют показатель затухания менее 0,2 дБ/км. Као первым предложил использовать волоконно-оптические кабели для передачи информации на большие расстояния (до этого их дальность ограничивалась несколькими метрами). По началу в эту идею мало кто верил, но личная роль учёного в процессе инженерной и коммерческой реализации проекта в корне изменила индустрию телекоммуникаций. В 1967 году родители Као эмигрировали в Англию, чтобы быть поближе к сыну и внукам (в 1961 у Чарлза и Гвен родился сын, а в 1963 - дочь). В 1970-ом он просит у руководства STC отпуск на 2 года, для формирования факультета электротехники в Гонконгском университете. Два года растянулись на четыре... Но после первого же выпуска своих студентов, Чарлз незамедлительно возвращается на работу в STC, чтобы не отстать от событий в области исследования оптоволокна. Также, за 4 года он очень соскучился по родителям, которые продолжали жить в Харлоу. В 1974 году проект, над которым работал Чарлз еще в 1966 году, благодаря техническому прогрессу подошел к стадии разработки подготовки производства. Настало время, чтобы реконструировать телекоммуникационные системы во всем мире. Поэтому ИТТ переводит Као на завод в Роаноке (штат Вирджиния). Сначала он получил должность руководителя исследовательских работ, позже вице-президента, а потом и Директора электрооптического отделения. В это время он часто посещает различные лаборатории в Европе, чтобы быть в курсе последних разработок. К 1980-ым годам оптоволокно во всем мире было проложено в

больших количествах, промышленность его производства развивалась бешеными темпами. Поэтому правление компании назначило Као координатором, отвечающего за все научно-исследовательские действия в этом направлении. Для этого Чарлз переезжает в главный офис компании в Коннектикут. Должность дала ему полную свободу действий. Пользуясь своим положением он создает Оптоэлектронный технологический проект "Терабит". Задание для этого проекта было достигнуто передачи данных в несколько терабит за секунду. С заданием справились на отлично - скорость была достигнута. Позже Чарлз Као скажет: "Интернет родился!". В 1986 году снова поступает предложение от Гонконгского университета. Као принимает предложение, и руководит университетом с 1987 по 1996. Такое странное решение было вызвано не столько предложением Гонконга, как то, что компания ИТТ начала продажу всех технических подразделений компании Alcatel. Потом работал генеральным директором компании Transtech.

В 1996 году в честь учёного назван астероид Каокуэн, открытый в 1981 году. В 2000 году основывает Академию развития независимого образования (Independent School Foundation Academy).

В начале 2004 года у Као обнаружили слабые признаки болезни Альцгеймера, которой ранее страдал его отец. В 2009 году Чарлз переехал в Калифорнию, чтобы быть поближе к своим детям, которые работают в Кремниевой долине.

В 2009 году Чарлзу Као была присуждена Нобелевская премия по физике "за выдающиеся достижения, касающиеся передачи световых сигналов в волокнах и развитие оптических систем передачи данных".

Као также награжден Премией Мори (1976), Премией Ранка (1978), премией Эрикссона (1979), Медалью Белла (1985), Премией Общества Маркони (1985), Медалью Фарадея (1989), Премией Макгрудри (1989), Орденом Британской империи (1993), Золотой медалью Великобритании (1995), Медалью принца Филиппа (1996), Премией Японии (1996), Премией Дрейпера (1999), Золотой медалью Гонконгского инженерного института (2006). Као является членом Лондонского королевского общества, Китайской академии наук, Европейской академии наук и искусств, тайваньской Academia Sinica[45,48].

Принцип передачи света, используемый в волоконной оптике, был впервые продемонстрирован во времена королевы Виктории (1837—1901 гг.), но прозрачность оптических проводов оставляла желать лучшего – электромагнитная волна внутри них быстро угасала). Кроме того, свет уходил из волокон через царапины и повреждения. Решение второй проблемы было найдено достаточно быстро – волокна стали плакировать, то есть покрывать слоем металла. Проблема затухания была решена Чарлзом Као, виновниками ослабления были ионы металлов, присутствующие в стекле. Революционная работа Као, вышедшая в 1966 году, содержала всего 8

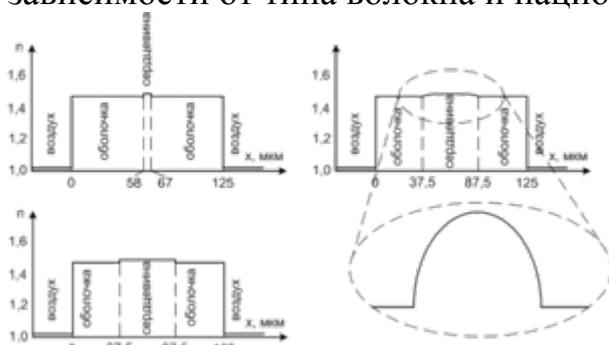
страниц. Немногим позже Као и его коллегой Хокамом была создана полная теория работы оптоволокна и предложен наиболее подходящий материал для его производства – плавленый кварц.

Изобретение лазеров сделало возможным построение волоконно-оптических линий передачи, превосходящих по своим характеристикам традиционные проводные средства связи. Стекланные оптические волокна делаются из кварцевого стекла, но для дальнего инфракрасного диапазона могут использоваться другие материалы, такие как флуоро-цирконат, флуоро-алюминат и халькогенидные стекла. Как и другие стекла, эти имеют показатель преломления около 1,5. В настоящее время развивается применение пластиковых оптических волокон.

Конструкция. Оптическое волокно имеет круглое сечение и состоит из двух частей — сердцевины и оболочки. Для обеспечения полного внутреннего отражения абсолютный показатель преломления сердцевины несколько выше показателя преломления оболочки. Например, если показатель преломления оболочки равен 1,474, то показатель преломления сердцевины — 1,479.

Луч света, направленный в сердцевину, будет распространяться по ней, испытывая многократные переотражения от границы раздела «сердцевина — оболочка».

Все оптические волокна, используемые в телекоммуникациях, имеют диаметр 125 ± 1 микрон. Диаметр сердцевины может отличаться в зависимости от типа волокна и национальных стандартов.



Профиль показателя преломления различных типов оптических волокон: слева сверху — одномодовое волокно, слева внизу — многомодовое ступенчатое волокно, справа — градиентное волокно с параболическим профилем.

Оптические волокна могут быть одномодовыми и многомодовыми. Диаметр сердцевины одномодовых волокон составляет от 7 до 9 микрон. Благодаря малому диаметру достигается передача по волокну лишь одной моды электромагнитного излучения, за счёт чего исключается влияние дисперсионных искажений. В настоящее время практически все производимые волокна являются одномодовыми.

Существует три основных типа одномодовых волокон:

1. Одномодовое ступенчатое волокно с несмещённой дисперсией (стандартное) (англ. SMF — Step Index Single Mode Fiber), определяется рекомендацией ITU-T G.652 и применяется в большинстве оптических

систем связи.

2. Одномодовое волокно со смещённой дисперсией (англ. DSF — Dispersion Shifted Single Mode Fiber), определяется рекомендацией ITU-T G.653. В волокнах DSF с помощью примесей область нулевой дисперсии смещена в третье окно прозрачности, в котором наблюдается минимальное затухание.
3. Одномодовое волокно с ненулевой смещённой дисперсией (англ. NZDSF — Non-Zero Dispersion Shifted Single Mode Fiber), определяется рекомендацией ITU-T G.655.

Многомодовые волокна отличаются от одномодовых диаметром сердцевины, который составляет 50 микрон в европейском стандарте и 62,5 микрон в североамериканском и японском стандартах. Из-за большого диаметра сердцевины по многомодовому волокну распространяется несколько мод излучения — каждая под своим углом, из-за чего импульс света испытывает дисперсионные искажения и из прямоугольного превращается в колоколоподобный.

Многомодовые волокна подразделяются на ступенчатые и градиентные. В ступенчатых волокнах показатель преломления от оболочки к сердцевине изменяется скачкообразно. В градиентных волокнах это изменение происходит иначе — показатель преломления сердцевины плавно возрастает от края к центру. Это приводит к явлению рефракции в сердцевине, благодаря чему снижается влияние дисперсии на искажение оптического импульса. Профиль показателя преломления градиентного волокна может быть параболическим, треугольным, ломаным и т. д.

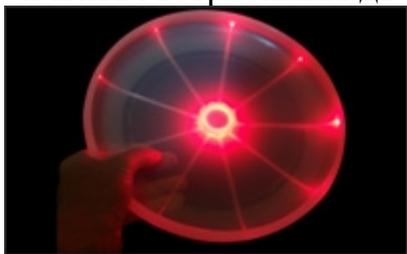
Основное применение оптические волокна находят в качестве среды передачи на волоконно-оптических телекоммуникационных сетях различных уровней: от межконтинентальных магистралей до домашних компьютерных сетей. Применение оптических волокон позволяет оперировать с чрезвычайно высокими скоростями передачи, измеряемыми терабитами в секунду. Оптическое волокно может быть использовано как датчик для измерения напряжения, температуры, давления и других параметров. Малый размер и фактическое отсутствие необходимости в электрической энергии, даёт волоконно-оптическим датчикам преимущество перед традиционными электрическими в определённых областях. Оптическое волокно используется в гидрофонах в сейсмических или гидролокационных приборах. Созданы системы с гидрофонами, в которых на волоконный кабель приходится более 100 датчиков. Системы с гидрофоновым датчиком используются в нефтедобывающей промышленности, а также флотом некоторых стран. Немецкая компания Sennheiser разработала лазерный микроскоп, работающий с лазером и оптическим волокном.

Волоконно-оптические датчики, измеряющие температуры и давления, разработаны для измерений в нефтяных скважинах. Они хорошо подходят для такой среды, работая при температурах, слишком высоких для полупроводниковых датчиков.

Разработаны устройства дуговой защиты с волоконно-оптическими

датчиками, основными преимуществами которых перед традиционными устройствами дуговой защиты являются: высокое быстродействие, нечувствительность к электромагнитным помехам, гибкость и лёгкость монтажа, диэлектрические свойства.

Оптическое волокно применяется в лазерном гироскопе, используемом в Boeing 767 и в некоторых моделях машин (для навигации). Специальные оптические волокна используются в интерферометрических датчиках магнитного поля и электрического тока. Это волокна, полученные при вращении заготовки с сильным встроенным двойным лучепреломлением.

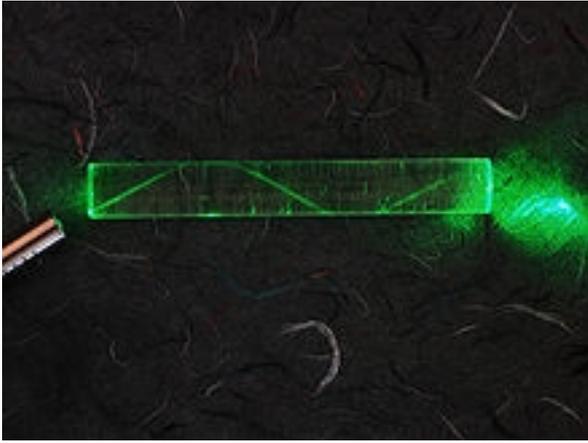


Диск фрисби, освещённый оптическим волокном

Оптические волокна широко используются для освещения. Они используются как световоды в медицинских и других целях, где яркий свет необходимо доставить в труднодоступную зону. В некоторых зданиях оптические волокна используются для обозначения маршрута с крыши в какую-нибудь часть здания. Волоконно-оптическое освещение также используется в декоративных целях, включая коммерческую рекламу, искусство и искусственные рождественские ёлки.

Оптическое волокно также используется для формирования изображения. Пучок света, передаваемый оптическим волокном, иногда используется совместно с линзами — например, в эндоскопе, который используется для просмотра объектов через маленькое отверстие.

Один из способов механической шифровки изображения заключается в следующем: большое количество оптических волокон, оба конца которых расположены упорядоченно, тщательно переплетают в середине, а затем разрезают пополам. Одна половина получившейся конструкции используется для шифровки изображения, а другая — для дешифровки: изображение, пройдя через переплетённые световоды, превращается в бессмысленный набор точек разного цвета, но после прохода через вторую половину этот набор точек восстанавливается до оригинала. Преимущество этого метода заключается в простоте изготовления шифрующего механизма и в невозможности расшифровать передаваемое изображение без шифратора или дешифратора (шифратор и дешифратор в такой системе абсолютно взаимозаменяемы). Недостаток заключается в значительной потере качества изображения, зависящей от толщины используемых световодов, и в необходимости очень точно позиционировать зашифрованное изображение перед дешифратором — малейший перекосяк будет препятствовать расшифровке.



Полное внутреннее отражение в оптической среде

В основе волоконно-оптической связи лежит явление полного внутреннего отражения электромагнитных волн на границе раздела диэлектриков с разными показателями преломления. Оптическое волокно состоит из двух элементов — сердцевины, являющейся непосредственным световодом, и оболочки. Показатель преломления сердцевины несколько больше показателя преломления оболочки, благодаря чему луч света, испытывая многократные переотражения на границе сердцевина-оболочка, распространяется в сердцевине, не покидая её.

Волоконно-оптическая связь находит всё более широкое применение во всех областях — от компьютеров и бортовых космических, самолётных и корабельных систем, до систем передачи информации на большие расстояния, например, в настоящее время успешно используется волоконно-оптическая линия связи Западная Европа — Япония, большая часть которой проходит по территории России. Кроме того, увеличивается суммарная протяжённость подводных волоконно-оптических линий связи между континентами.

Волокно в каждый дом (англ. *Fiber to the premises*, *FTTP* или *Fiber to the home*, *FTTH*) — термин, используемый телекоммуникационными провайдерами, для обозначения широкополосных телекоммуникационных систем, базирующихся на проведении волоконного канала и его завершения на территории конечного пользователя путём установки терминального оптического оборудования для предоставления комплекса телекоммуникационных услуг, включающего:

- высокоскоростной доступ в Интернет;
- услуги телефонной связи;
- услуги телевизионного приёма.

Стоимость использования волоконно-оптической технологии уменьшается, что делает данную услугу конкурентоспособной по сравнению с традиционными услугами.

Историю систем передачи данных на большие расстояния следует начинать с древности, когда люди использовали дымовые сигналы. С того времени эти системы кардинально улучшились, появились сначала телеграф, затем —

коаксиальный кабель. В своем развитии эти системы рано или поздно упирались в фундаментальные ограничения: для электрических систем это явление затухания сигнала на определённом расстоянии, для СВЧ — несущая частота. Поэтому продолжались поиски принципиально новых систем, и во второй половине XX века решение было найдено — оказалось, что передача сигнала с помощью света гораздо эффективнее как электрического, так и СВЧ-сигнала.

В 1966 году Као и Хокман из STC Laboratory (STL) представили оптические нити из обычного стекла, которые имели затухание в 1000 дБ/км (в то время как затухание в коаксиальном кабеле составляло всего 5-10 дБ/км) из-за примесей, которые в них содержались и которые в принципе можно было удалить. Существовало две глобальных проблемы при разработке оптических систем передачи данных: источник света и носитель сигнала. Первая разрешилась с изобретением лазеров в 1960 году, вторая — с появлением высококачественных оптических кабелей в 1970 году. Это была разработка Corning Glass Works. Затухание в таких кабелях составляло около 20 дБ/км, что было вполне приемлемым для передачи сигнала в телекоммуникационных системах. В то же время, были разработаны достаточно компактные полупроводниковые GaAs-лазеры. После интенсивных исследований в период с 1975 по 1980 год появилась первая коммерческая волоконно-оптическая система, оперировавшая светом с длиной волны 0,8 мкм и использовавшая полупроводниковый лазер на основе арсенида галлия (AsGa). Битрейт систем первого поколения составлял 45 Мбит/с, расстояние между повторителями — 10 км. 22 апреля 1977 года в Лонг-Бич, штат Калифорния, компания General Telephone and Electronics впервые использовала оптический канал для передачи телефонного трафика на скорости 6 Мбит/с.

Второе поколение волоконно-оптических систем было разработано для коммерческого использования в начале 1980-х. Они оперировали светом с длиной волны 1,3 мкм от InGaAsP-лазеров. Однако такие системы всё ещё были ограничены из-за рассеивания, возникающего в канале. Однако уже в 1987 году эти системы работали на скорости до 1,7 Гбит/с при расстоянии между повторителями 50 км. Первый трансатлантический телефонный оптический кабель — ТАТ-8 — был введён в эксплуатацию в 1988 году. В его основе лежала оптимизированная технология Desurvire усиления лазера. ТАТ-8 разрабатывался как первый подводный волоконно-оптический кабель между Соединёнными Штатами и Европой. Разработка систем волнового мультиплексирования позволила в несколько раз увеличить скорость передачи данных по одному волокну и к 2003 году при применении технологии спектрального уплотнения была достигнута скорость передачи 10,92 Тбит/с (273 оптических канала по 40 Гбит/с). В 2009 году лаборатории Белла посредством мультиплексирования 155 каналов по 100 Гбит/с удалось передать сигнал со скоростью 15,5 Тбит/с на расстояние 7000 километров.

Скорость передачи данных по волоконно-оптическим сетям в ближайшие десятилетия может достичь 1 Пб\с, однако дальнейший рост будет сопряжен с

очень большими трудностями, заявил академик Евгений Дианов, выступая на заседании президиума РАН.

Академик отмечает, что скорости передачи данных увеличивались в 10 раз за каждые четыре года, и сейчас коммерчески доступны технологии со скоростями до 10 терабит в секунду, а в экспериментальных условиях получалось достичь скоростей до 100 терабит в секунду.

При этом ученый отметил, что превысить скорость 100 терабит в секунду с использованием нынешних световодов на базе кварцевого стекла невозможно.

Дальнейший рост, по его словам, может происходить благодаря применению многосердцевидных оптических кабелей. Такие световоды были созданы. В 2011 году была опубликована первая работа об эксперименте, в рамках которого была достигнута скорость 1 петабит в секунду — с помощью 12-сердцевидного кабеля, где каждый световод был рассчитан на 400 гигабит в секунду.

Революция фотоаппарата. В 60-годах прошлого Уиллард Бойл и Джордж Смит, будущие лауреаты Нобелевской премии 2009 года работали в Bell Labs. В это время главным проектом этого исследовательского подразделения корпорации AT&T было создание запоминающего устройства на тонких магнитных пленках Vuble Memory. Устройство было создано, но, после открытия гигантского магнетосопротивления, цены на жесткие диски упали и производство устройств типа Vuble Memory стало нерентабельным. Но в 60-е годы проект Vuble Memory шел полным ходом и в октябре 1969 года тогдашний вице-президент Bell Labs Джек Мортон решил сократить финансирование подразделения, которое занималось полупроводниковыми схемами. Чтобы не допустить этого, глава подразделения Уиллард Бойл решил срочно придумать конкурента Vuble Memory. Для этого он и руководитель одного из отделов Джордж Смит 17 октября 1969 года засели в офисе Бойла и занялись интенсивным мозговым штурмом. Спустя примерно час на свет родилась идея ПЗС-матрицы (Charge-Coupled Device - CCD).

Американский физик канадского происхождения Уиллард Стерлинг Бойл (Willard Sterling Boyle) родился 8 июля 1924 года в Амхерсте (провинция Новая Шотландия, Канада).

Мать Уилларда была врачом. В трехлетнем возрасте он вместе с семьей переехал в Квебек. До 14 лет учился дома под присмотром матери. После этого поступил в Монреальский Lower Canada College, где получил среднее образование. В 1943 году из-за Второй Мировой войны прервал обучение в Университете Макгилла, чтобы присоединиться к Канадскому военно-морскому флоту. Потом вступил в ряды Британского военно-морского флота. После войны получил степень бакалавра (1947), степень магистра (1948) и степень доктора философии (1950) в Университете Макгилла. После окончания обучения провел один год в Канадской радиационной лаборатории. Потом Бойл переехал в Кингстон (провинция Онтарио), где

два года преподавал физику в Королевском канадском военном колледже. В 1953 году начал работать в Лаборатории Белла. Через 9 лет совместно с Доном Нельсоном изобрел непрерывно работающий рубиновый лазер. В 1962 году стал директором отдела Космических исследований Беллкомм (филиал Лаборатории Белла). Во время пребывания на этой должности оказывал поддержку в разработке космической программы "Аполлон", также помогал выбирать участки для прилунения. В 1964 году Бойл вернулся в Лабораторию Белла и начал работать над разработкой интегральных схем. В 1969 Бойл и Джордж Смит изобрели ПЗС-матрицу (сокр. "прибор с зарядовой связью"). ПЗС-матрица состоит из поликремния, отделённого от кремниевой подложки, у которой при подаче напряжения через поликремневые затворы изменяются электрические потенциалы вблизи электродов. До экспонирования, обычно подачей определённой комбинации напряжений на электроды, происходит сброс всех ранее образовавшихся зарядов, и приведение всех элементов в идентичное состояние. Далее комбинация напряжений на электродах создаёт потенциальную яму, в которой могут накапливаться электроны, образовавшиеся в данном пикселе матрицы в результате воздействия света при экспонировании. Чем интенсивнее световой поток во время экспозиции, тем больше накапливается электронов в потенциальной яме, соответственно, тем выше итоговый заряд данного пикселя. После экспонирования последовательные изменения напряжения на электродах формируют в каждом пикселе и рядом с ним распределение потенциалов, которое приводит к перетеканию заряда в заданном направлении к выходным элементам матрицы.

За это изобретение они совместно были награждены в 1973 - Медалью Стюарта Баллантайна от Университета Франклина, в 1974 - Премией Морриса Либманна, в 2006 - Премией Чарлза Старка Дрейпера, в 2009 Нобелевской премией по физике "за разработку оптических полупроводниковых сенсоров — ПЗС-матриц".

Бойл был исполнительным директором исследований Лаборатории Белла с 1975 года до отставки в 1979 году. После отставки он поселился в Новой Шотландии в городке Уолласе, и помог своей жене Бетти открыть картинную галерею, где жена выставляла свои пейзажи. Уиллард связал свою судьбу с Бетти еще в 1947 году. Сегодня у него четверо детей, десять внуков и один правнук. В 2009 году Уиллард и Бетти переехали в Галифакс. Уиллард Бойл скончался 9 мая 2011 года.

Американский физик **Джордж Элвуд Смит** (George Elwood Smith) родился 10 мая 1930 года в Уайт-Плейнс, штат Нью-Йорк.

После службы в Военно-морском флоте США поступил в Пенсильванский университет, где в 1955 получил степень бакалавра. В 1959 в Чикагском университете получил степень доктора философии. Докторская диссертация Смита состояла всего из трех страниц. Позже о своей диссертации он говорил: "Коротка, но зато очень хороша!" С 1959 до отставки в 1986 работал в Лаборатории Белла (Мюррей, штат

Нью-Джерси), где проводил исследования по разработке лазеров и полупроводниковых устройств. За это время получил около 30 патентов и, в конечном счете, возглавил отдел по разработке интегральных схем. В 1969 Бойл и Джордж Смит изобрели ПЗС-матрицу (сокр. "прибор с зарядовой связью"). ПЗС-матрица состоит из поликремния, отделённого от кремниевой подложки, у которой при подаче напряжения через поликремневые затворы изменяются электрические потенциалы вблизи электродов. До экспонирования, обычно подачей определённой комбинации напряжений на электроды, происходит сброс всех ранее образовавшихся зарядов, и приведение всех элементов в идентичное состояние. Далее комбинация напряжений на электродах создаёт потенциальную яму, в которой могут накапливаться электроны, образовавшиеся в данном пикселе матрицы в результате воздействия света при экспонировании. Чем интенсивнее световой поток во время экспозиции, тем больше накапливается электронов в потенциальной яме, соответственно, тем выше итоговый заряд данного пикселя. После экспонирования последовательные изменения напряжения на электродах формируют в каждом пикселе и рядом с ним распределение потенциалов, которое приводит к перетеканию заряда в заданном направлении к выходным элементам матрицы.

За это изобретение они совместно были награждены в 1973 - Медалью Стюарта Баллантайна от Университета Франклина, в 1974 - Премией Морриса Либманна, в 2006 - Премией Чарльза Старка Дрейпера, в 2009 Нобелевской премией по физике "за разработку оптических полупроводниковых сенсоров — ПЗС-матриц".

И Смит и Бойл были очень хорошими моряками и совершили вместе множество морских путешествий. После отставки Джордж вместе со своей женой Джанет плавал вокруг света на протяжении семнадцати лет. В 2003 году пришлось бросить хобби, так как состояние здоровья Джорджа ухудшилось. Сейчас он живет в Уоретауне в штате Нью-Джерси [45,48].

Прибор с зарядовой связью. Вторая половина Нобелевской премии 2009 года была присуждена Уилларду Бойлу и Джорджу Смицу за изобретение прибора с зарядовой связью — ПЗС (по-английски *CCD* — charged-coupled device). Так называют полупроводниковое устройство, которое позволяет делать фотографии сразу же в цифровом формате: был световой поток — и из него сразу же получился файл с изображением. Сейчас, когда цифровая фотография стала такой привычной, теряется ощущение того, насколько революционным оказалось это открытие. А ведь еще несколько десятилетий назад цифровая обработка фотографических данных, применявшаяся сугубо в научных исследованиях, была длительной и многошаговой. Изображение фиксировалось на пленку, проявлялось, печаталось, затем сканировалось, превращалось в файл и только затем обрабатывалось. ПЗС-матрица, которая, минуя все эти этапы, сразу же давала пригодное для обсчета цифровое изображение, резко упростила и ускорила весь процесс наблюдения и обработки данных.

Прибор с зарядовой связью стал возможен благодаря двум вещам: удивительному классу материалов, которые создала природа, — полупроводникам, и смекалке исследователей, которые придумали, как в полной мере использовать их свойства. Бойл и Смит, будучи сотрудниками знаменитой лаборатории Bell Labs (на счету которой, кстати, уже семь Нобелевских премий, но которая, несмотря на это, решила в прошлом году прикрыть свою группу фундаментальных исследований), получили задание придумать эффективное полупроводниковое устройство для записи и считывания информации, в котором информация хранилась бы в виде микроскопических «облачков заряда». Цель этого задания — составить конкуренцию другому подразделению той же Bell Labs, в котором уже полным ходом шла разработка элементов памяти на основе «магнитных пузырьков». При этом ни о какой светочувствительности речь пока не шла — задача касалась только устройства для хранения и считывания информации. В памятный день 17 октября 1969 года Бойл и Смит взялись за эту задачу и буквально в течение часа набросали на доске прототип требуемого устройства с зарядовой связью. Ключевым его элементом является простейшая **МОП-структура** («металл—оксид—полупроводник») — слойка, состоящая из металлического слоя и слоя полупроводника, разделенного тонкой прослойкой изолятора, обычно оксида кремния (см. рис. 5). Полупроводник при этом выбирается такой, в котором главными носителями заряда являются не электроны, а «дырки», то есть полупроводник *p*-типа (простейшее введение см. на страничке [Электрический ток в полупроводниках](#)). К металлическому «пяточку» подходит электрод, и на него может подаваться нужное напряжение.



Роль «бита» в таком устройстве должно играть облачко электронов. Однако хранить его в полупроводнике *p*-типа просто так не получится: «дырки» тут же набегут и «поглотят» все свободные электроны. Поэтому требуется создать небольшую область, в которой дырок будет очень мало, и одновременно сделать так, чтоб электроны никуда из этой области не разбежались. Оба этих требования удовлетворяются единым махом, если на металлический электрод подать положительное напряжение. Под действием возникшего электрического поля дырки из-за своего положительного заряда уйдут прочь из небольшой зоны, расположенной прямо под электродом, а электроны — наоборот, будут в ней «сидеть» и никуда не уходить. Образуется «ловушка для электронов», которая и хранит информацию. Если в ловушке есть электроны — в ячейке записана «единичка», если нет — «нуль».

Впрочем, тут же возникает вопрос: а как считывать эту информацию? Стоит только «отпустить» положительное напряжение, как электронное облачко исчезнет. Вот для этой цели Бойл и Смит и придумали новый метод передачи данных, названный **зарядовой связью** (рис. 6).

Пусть у нас есть ряд из МОП-структур — этакая одномерная ПЗС-матрица.

К каждой ячейке памяти подходят электроды; кроме того, имеются и вспомогательные, не информационные МОП-структуры, разделяющие ячейки памяти. При хранении информации на информационных ячейках подано нужное напряжение, а на вспомогательных — нет. Затем разом на все соседние ячейки — скажем, справа — тоже подается нужное напряжение, и в результате каждая «ловушка для электронов» расширяется на две ячейки. Следующим шагом напряжение с исходных ячеек снимается, «ловушка для электронов» снова сжимается, но при этом она уже переместилась на шаг вправо, и все электроны послушно перетекают за ней. Таким образом, информация во всех ячейках памяти синхронно сдвинулась вправо. Так продолжается цикл за циклом, а на выходе из этой «линейки» стоит одно-единственное считывающее устройство, которое просто воспринимает приходящий на него заряд и выдает обычный цифровой электрический сигнал.

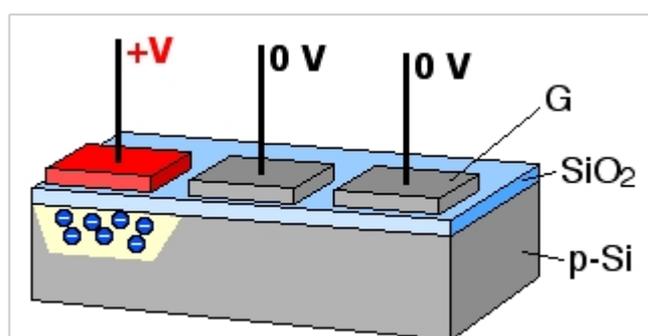
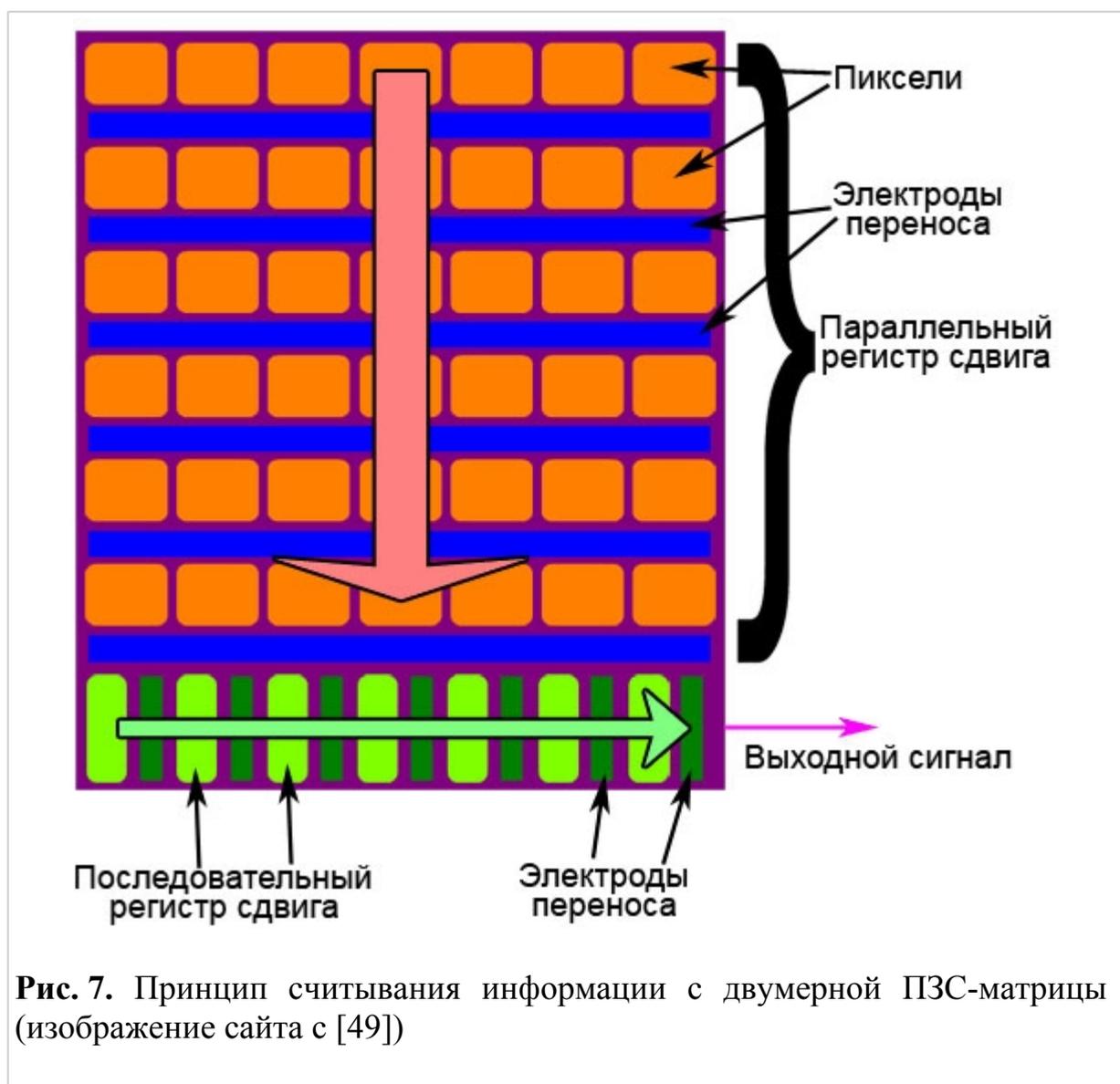


Рис. 6. Принцип работы зарядовой связи в ПЗС-матрице (изображение с сайта wikipedia.org)

Для двумерной ПЗС-матрицы принцип считывания аналогичен (см. рис. 7). Первым делом вся матрица синхронно сдвигается на один регистр вниз, затем с самой нижней линейки (и только с нее одной) считывается поступившая колонка битов так, как описано выше. После этого вся матрица снова сдвигается на один регистр вниз, с нижней линейки снова считывается информация, и так далее. В результате в очень компактной полупроводниковой конфигурации и с помощью одного-единственного устройства, детектирующего пришедший заряд, можно последовательно, строчка за строчкой, считать весь массив данных.



До сих пор речь шла только о манипулировании ячейками памяти и считывании информации. Однако эту информацию вовсе не обязательно туда записывать — она могла возникнуть там **самостоятельно** при облучении ПЗС-матрицы светом. Так получается потому, что полупроводник обладает еще одним уникальным свойством — светочувствительностью. Световые фотоны, попадая внутрь полупроводника, порождают в нем пары электронов и дырок. Если такой процесс происходит в МОП-структуре, в пределах изначально пустой «ловушки для электронов», то электроны оседают в ней, а дырки уходят прочь. В результате с течением времени в ловушке накапливается заряд, примерно пропорциональный поглощенному световому потоку. Получается, что МОП-структура работает как светочувствительный пиксел с довольно большим диапазоном градаций яркости. И если теперь в процессе считывания устройство будет не просто детектировать отсутствие или наличие заряда в очередной ячейке памяти, но и сможет измерить накопившийся заряд, то у нас и получится самое настоящее оптическое изображение, записанной сразу в цифровом виде. Конечно, современные ПЗС-матрицы значительно совершеннее, чем эта

простейшая схема. Современная ПЗС-матрица умеет распознавать цвета, знает, как избежать переполнения «ловушек для электронов», да и сама она построена по усовершенствованной полупроводниковой технологии. Некоторые подробности можно найти в статьях Тенденции в цифровой фотографии, часть 3 и Сердце цифровой камеры: ПЗС-матрица.

Ну а что касается применений ПЗС-матриц, то они давно вошли в нашу жизнь в виде компактных цифровых фото- и видеокамер. Миниатюрные размеры ПЗС-матриц привели к революции и в медицинском деле, поскольку резко расширили как диагностические (например, при различных вариантах эндоскопии), так и оперативные возможности врача. Благодаря им развилась техника минимально инвазивной хирургии (лапароскопия). Кроме того, сейчас ПЗС-матрицы широко используются не только для детектирования оптического излучения, но и в других областях спектра, в частности они применяются в малодозных цифровых рентгеновских установках. На основе ПЗС функционируют вершинные детекторы для регистрации элементарных частиц, рождающихся на современных коллайдерах. ПЗС матрицы стоят во всех современных телескопах, включая космические. Но началось всё именно с догадки Бойла и Смита о том, как хранить и последовательно передавать «облачка электронов» в полупроводнике.

3.3. Графен. Нобелевская премия 2010 года.

В журнале Nature появилось несколько статей ученых из Манчестерского университета Великобритании и их коллег из Германии и Голландии, посвященных очередному прорыву в исследованиях тончайших углеродных материалов — графенов. Неформальные лидеры этого интернационального научного коллектива, специалисты Группы мезоскопной физики (автономного подразделения Манчестерского университета) Андре Гейм и Костя Новоселов — наши экс-соотечественники, в бытность гражданами СССР и России звавшиеся Андреем и Константином. Полученные Геймом, Новоселовым и их коллегами стабильные углеродные наноматериалы толщиной всего в один атом углерода (порядка 0,1 нм) могут стать основой будущей микроэлектроники, сменив современные кремниевые технологии.

Экспериментальное открытие графена в 2004 году все той же группой Гейма-Новоселова стало важнейшим звеном в цепочке исследований углеродных структур, начало которым было положено в 1985-м, когда ученым удалось обнаружить принципиально новые углеродные соединения — фуллерены, каркасные сферические многогранники, составленные из правильных пяти— и шестиугольников с атомами углерода в вершинах. Их существование предсказали А.А.Бочвар и Е.Н.Гальперин в 1973 году. Открывшие фуллерены британец Гарольд Крото и американцы Роберт Керл и Ричард Смолли в 1996 году получили Нобелевскую премию по химии. Название фуллерены получили от имени известного американского архитектора Букминстера Фуллера, использовавшего правильные пяти- и шестиугольники в сооружении куполов и сферических конструкций. К слову сказать, Гейм после эмиграции долгое время работал в голландском Университете Неймегена и, до того как всерьез увлекся графеновыми исследованиями и

переехал в Великобританию, успел в 2000 году стать «шнобелевским» лауреатом в области физики за «использование магнитов для подвешивания (левитации) лягушки» (такова официальная формулировка создателей альтернативной научной премии, присудивших ему эту шуточную награду). (В начале 2010 года авторами в одной из книг было написано: Оценить шансы Гейма стать обладателем истинной нобелевской премии пока довольно трудно, но почти наверняка можно утверждать, что они отнюдь не равны нулю.)

Андрей Константинович Гейм (*нидерл. Andre Geim*; 21 октября 1958, Сочи) — советский и нидерландский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 2010 года (совместно с Константином Новосёловым), член Лондонского королевского общества (с 2007), известный в первую очередь как один из первооткрывателей графена.

В 1964 году семья Гейма переехала в Нальчик. Отец, Константин Алексеевич Гейм (1910—1998), с 1964 года работал главным инженером Нальчикского электровакуумного завода; мать, Нина Николаевна Байер (род. 1927), работала главным технологом там же.

В 1975 году Андрей Гейм окончил с золотой медалью среднюю школу № 3 города Нальчика и пытался поступить в МИФИ, но неудачно (препятствием явилось немецкое происхождение абитуриента). Поработав 8 месяцев на Нальчикском электровакуумном заводе, в 1976 году поступил в Московский физико-технический институт. До 1982 года обучался на факультете общей и прикладной физики, окончил с отличием («четвёрка» в дипломе только по политэкономии социализма) и поступил в аспирантуру. В 1987 году получил степень кандидата физико-математических наук в Институте физики твёрдого тела РАН. Работал научным сотрудником в ИФТТ АН СССР и в Институте проблем технологии микроэлектроники АН СССР.

В 1990 году получил стипендию Английского королевского общества и уехал из Советского Союза. Работал в Ноттингемском университете, университете Бата, а также недолго в Копенгагенском университете, перед тем как стал доцентом университета Неймегена, а с 2001 года — Манчестерского университета. В настоящее время — руководитель Манчестерского центра по «мезонауке и нанотехнологиям», а также глава отдела физики конденсированного состояния.

Почётный доктор Делфтского технического университета, Швейцарской высшей технической школы Цюриха и Антверпенского университета. Имеет звание «профессор Лэнгуорти» Манчестерского университета (*англ. Langworthy Professor*, среди удостоенных этого звания были Эрнест Резерфорд, Лоурэнс Брэгг и Патрик Блэкетт). В 2008 году получил предложение возглавить Институт Макса Планка в Германии, но ответил отказом.

Подданный Королевства Нидерландов. Супруга — Ирина Григорьевна (выпускница Московского института стали и сплавов), работала, как и Гейм, в ИФТТ АН СССР, в настоящее время работает вместе с мужем в лаборатории Манчестерского университета.

После присуждения Гейму Нобелевской премии было объявлено о намерении

пригласить его работать в Сколково. Гейм заявил: Там у вас люди что – с ума походили совсем? Считают, что если они кому-нибудь отсыпят мешок золота, то можно всех пригласить? При этом Гейм сказал, что не имеет российского гражданства и чувствует себя в Великобритании комфортно, выразив скептическое отношение к проекту российского правительства создать в стране аналог Кремниевой долины.

Среди научных достижений Гейма можно отметить создание биомиметического адгезива (клея), позднее ставшего известным как gecko tape.



Левитирующая лягушка в эксперименте А. Гейма и М. Берри

Также широко известен эксперимент с диамагнитной левитацией, в том числе, со знаменитой «летающей лягушкой», за который Гейм вместе с известным математиком и теоретиком сэром Майклом Берри из университета Бристоля получил в 2000 году Шнобелевскую премию.

В 2004 году Андрей Гейм совместно со своим учеником Константином Новосёловым изобрёл технологию получения графена — нового материала, представляющего собой одноатомный слой углерода. Как выяснилось в ходе дальнейших экспериментов, графен обладает рядом уникальных свойств: он обладает повышенной прочностью, проводит электричество так же хорошо, как медь, превосходит все известные материалы по теплопроводности, прозрачен для света, но при этом достаточно плотен, чтобы не пропустить даже молекулы гелия — самые мелкие из известных молекул. Всё это делает его перспективным материалом для ряда приложений, таких как создание сенсорных экранов, световых панелей и, возможно, солнечных батарей.

За это открытие Институт физики (Великобритания) в 2007 году наградил Гейма медалью Мотта. Он также получил престижную премию «Еврофизика» (англ. EuroPhysics) (совместно с Константином Новосёловым). В 2010 году изобретение графена было также отмечено Нобелевской премией по физике, которую Гейм также разделил с Новосёловым.

Андрей Гейм увлекается горным туризмом. Его первым «пятитысячником» стал Эльбрус, а любимая гора — Килиманджаро.

Учёный отличается своеобразным юмором. Одно из подтверждений тому — статья о диамагнитной левитации, в которой соавтором Гейма был указан его любимый хомяк («хамстер») Тиша. Сам Гейм по этому поводу заявил, что вклад хомяка в эксперимент с левитацией был более непосредственным. Впоследствии эта работа использовалась при получении степени доктора философии.

Константи́н Серге́евич Новосёлов (род. 23 августа 1974(19740823), Нижний Тагил, СССР) — российский и британский физик. Лауреат Нобелевской премии по физике 2010 года (совместно с Андреем Геймом), член Лондонского королевского

общества (с 2011). Самый молодой из ныне живущих нобелевских лауреатов во всех областях (по состоянию на 2010 год). По состоянию на март 2011 года имеет более 20000 цитирований своих работ. Индекс Хирша — 38. Опубликовал более 60 научных статей, включая 9 статей в журналах Nature и Science.

Константин Новосёлов родился 23 августа 1974 года в городе Нижний Тагил. Отец Сергей Викторович — инженер, мать Татьяна Глебовна — учитель английского языка. Есть сестра Елена. Учился в школе № 39. Первый успех в учебе пришел уже в шестом классе — в 1986 году он занял первое место в областной олимпиаде по физике, а на Всесоюзной олимпиаде школьников СССР вошел в десятку сильнейших. С 1988—1991 годах дополнительно обучался в Заочной физико-технической школе. В 1990 и 1991 годах участвовал во всесоюзных олимпиадах по физике и математике. В 1991 году после окончания школы поступил в Московский физико-технический институт. В 1997 году окончил с отличием факультет физической и квантовой электроники МФТИ по специализации «нанoeлектроника». После окончания института два года работал в Черноголовке в Институте проблем технологии микроэлектроники РАН (ИПТМ РАН), был аспирантом ИПТМ РАН (руководитель — Юрий Дубровский).

В 1999 году переехал в Нидерланды, где стал работать с Андреем Геймом в Университете Неймегена. Вместе с ним в 2001 году перебрался в Манчестерский университет. В 2003 году Новосёлов защитил диссертацию на степень доктора философии под руководством профессора Ян-Кееса Маана. Является профессором и членом Королевского научного общества Манчестерского университета.

Проживает в Манчестере, имеет двойное российско-британское гражданство. Супруга Ирина родом из Вологды, кандидат наук (защищала диссертацию в Санкт-Петербурге), микробиолог, познакомились в Нидерландах. В 2009 году родились дочери-двойняшки — Вика и Софья.

В интервью после присуждения Нобелевской премии Новосёлов так высказался о возможности работы в России: Мне очень нравится, как устроена работа в университете Манчестера, где я сейчас занимаюсь научной деятельностью, но, если бы мне сделали интересное предложение по работе в России, возможно я бы и вернулся. Хотя... нет, всё-таки вряд ли. Дело в том, что организация работы в той же Англии намного проще и прозрачнее, чем в России или, скажем, в Германии. Дело не только в деньгах.



Константин Новосёлов в лаборатории

Занимается исследованиями в области мезоскопической физики и нанотехнологий. В 2004 году совместно со своим руководителем Андреем Геймом открыл новую аллотропную модификацию углерода — графен, который представляет собой одинарный слой атомов углерода.

В 2007—2008 годах получил ряд наград для молодых учёных, в частности, в 2007 европейскую премию Николаса Курти за работы в сфере исследования низких температур и магнитных полей. В 2008 году Новосёлов и Гейм получили премию «Еврофизика» за «открытие графена и выяснение его замечательных электронных свойств». В 2010 году вместе со своим учителем Андреем Геймом был удостоен Нобелевской премии по физике за «передовые опыты с двумерным материалом — графеном». Лауреатам удалось «продемонстрировать, что монослойный углерод обладает исключительными свойствами, которые проистекают из удивительного мира квантовой физики», отметили в Нобелевском комитете. Новосёлов стал самым молодым нобелевским лауреатом по физике за последние 37 лет (с 1973 года) и единственным на 2010 год лауреатом во всех областях, родившимся позднее 1961 года.

За выдающийся вклад в нидерландскую науку 24 ноября 2010 года произведён в командоры ордена Нидерландского льва. 19 мая 2011 года избран членом Лондонского королевского общества[45,48].

Графен вместо кремния. В 1991 году сотрудник японской корпорации NEC Сумио Идзима выяснил, что атомы углерода могут образовывать не только сферические, но и полые цилиндрические структуры — длиной до сотен микрометров и диаметром около нанометра. Свежеиспеченные (в буквальном смысле этого слова: эксперименты проводились при температуре порядка 4 тыс. градусов) макромолекулы получили название углеродных нанотрубок. В дальнейшем учеными были получены нанотрубки разной геометрии — как однослойные, так и многослойные, напоминающие свиток.

Два года назад на свет появился еще один принципиально новый класс наноматериалов — сверхтонкие углеродные пленки. Их первооткрыватели Андре Гейм и Константин Новоселов назвали эти особые пленки графеновыми, а составляющий их материал — графеном. Практически одновременно с группой Гейма-Новоселова к схожим результатам пришли их американские коллеги из Принстонского университета (лаборатория профессора Али Яздани). Графен, слой атомов углерода, соединенных в гексагональную (шестигранную) кристаллическую решетку, по большому счету можно считать двумерной копией трехмерного графита. Его можно представить как одну плоскость (единичный слой) графита, отделенную от объемного кристалла. Или же, как еще часто говорят, графеновые пленки — это как бы раскатанные в одной плоскости миллионы углеродных нанотрубок, сцепленных друг с другом на очень большом «листе» атомарной толщины.

Интересно отметить, что теоретическое исследование графена началось

задолго до получения реальных образцов этого материала: первые публикации о возможных физических свойствах двумерных кристаллов появились в научной периодике еще в 30–40-е годы XX века. Однако вскоре теоретики пришли к выводу, что свободную идеальную двумерную пленку получить невозможно из-за ее нестабильности при сворачивании или скручивании, а тепловые флуктуации приводят к плавлению двумерного кристалла при любой конечной температуре. Лишь после экспериментального открытия углеродных нанотрубок ученые вновь увлеклись поисками двумерных углеродных наноструктур, благо теоретическая база для таких материалов в приложении к углеродным нанотрубкам была к тому времени уже достаточно хорошо проработана. По словам одного из ведущих мировых специалистов в этой области американца Уолта де Хиира, «нанотрубка — это тот же графен, только скрученный в цилиндр. Поэтому при изучении узких полосок графена мы можем наблюдать те же физические и химические свойства, что и у углеродных нанотрубок». Американский ученый полагает, что однослойные углеродные нанотрубки — только первая ступень в развитии наноэлектроники, а конечная почти наверняка будет базироваться на графене.

Один из ведущих мировых специалистов по полупроводниковым технологиям профессор Ноттингемского университета Лоуренс Ивз высказал мнение, что открытие группы Гейма — это «одно из самых ярких событий, произошедших в области физики твердого тела за последнее десятилетие».

Графеновая бумага. Новый материал на основе углерода, разработанный американскими учеными и получивший название графеновой бумаги, может оказаться не менее революционным изобретением. В работе, опубликованной в *Nature*, ученые из Северо-Западного университета в США под руководством профессора Родни Руоффа (Rodney Ruoff) сообщили о синтезе нового материала на основе графена, который может найти многочисленные применения. Ученым удалось получить т.н. графеновую бумагу, состоящую из нескольких слоев сшитых между собой листов оксида графена. У графена уникальные оптические, электрические, термические и механические свойства. Материалы на основе графена будут исключительно прочными и долговечными, уступая, возможно, лишь алмазу. Руофф и его коллеги провели реакцию окисления графита. Полученный оксид при добавлении воды образует суспензию оксида графена. При последующем удалении воды простым фильтрованием слои оксида графена формируют на фильтре диаметром в 5 дюймов (12,7 см) слой «бумаги» толщиной в 100 микрон. Напомним, что и обычная целлюлозная бумага получается аналогичным способом. Интересно, что американские ученые предложили и несколько способов регулировать свойства графеновой бумаги. Основным инструментом здесь является степень окисления графита. По мере увеличения степени окисления проводящий материал становится сначала полупроводником, а затем и диэлектриком. Это открывает большие возможности для создания различных электротехнических материалов, в том

числе наносимых на стеклянные поверхности. Можно будет использовать графеновую бумагу при создании солнечных элементов и различных вариантов «электронной бумаги». Среди других возможных применений Руофф называет, в первую очередь, различные композиционные материалы, применяемые в авиации, автомобильной промышленности, строительстве.

Графён (англ. graphene) — слой атомов углерода, соединённых посредством sp^2 связей в гексагональную двумерную кристаллическую решётку, с постоянной решетки 0,246 нм. Его можно представить как одну плоскость графита, отделённую от объёмного кристалла. По оценкам, графен обладает большой механической жёсткостью и хорошей теплопроводностью (~ 1 ТПа и $\sim 5 \times 10^3$ Вт·м⁻¹·К⁻¹ соответственно). Важнейшей особенностью электронных свойств графена является нулевая эффективная масса носителей, как электронов, так и дырок, а также нулевая ширина запрещенной зоны. Высокая подвижность носителей тока при комнатной температуре делает его перспективным материалом для использования в самых различных приложениях, в частности, как будущую основу нанoeлектроники и возможную замену кремния в интегральных микросхемах [31].

Основной из существующих в настоящее время способов получения графена основан на механическом отщеплении или отшелушивании слоёв графита. Он позволяет получать наиболее качественные образцы с высокой подвижностью носителей. Этот метод не предполагает использования масштабного производства, поскольку это ручная процедура. Другой известный способ — метод термического разложения подложки карбида кремния гораздо ближе к промышленному производству. Поскольку графен впервые¹ был получен только в 2004 году, он ещё недостаточно хорошо изучен и привлекает к себе повышенный интерес.

Данный материал не является просто кусочком других аллотропных модификаций углерода: графита, алмаза — из-за особенностей энергетического спектра носителей он проявляет специфические, в отличие от других двумерных систем, электрофизические свойства.

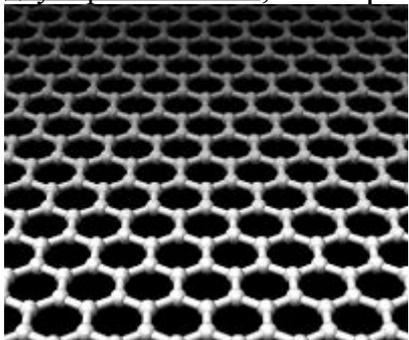


Рис.1 . Идеальная кристаллическая структура графена представляет собой гексагональную кристаллическую решётку.

Получение графена. Графен является двумерным кристаллом, состоящим из одиночного слоя атомов углерода, собранных в гексагональную решётку. Его теоретическое исследование началось задолго до получения реальных образцов материала, поскольку из графена можно собрать трёхмерный

кристалл графита. Графен является базой для построения теории этого кристалла. Графит является полуметаллом, и как было показано в 1947 году П. Воллесом, в зонной структуре графена также отсутствует запрещённая зона, причём в точках соприкосновения валентной зоны и зоны проводимости энергетический спектр электронов и дырок линеен как функция волнового вектора. Такого рода спектром обладают безмассовые фотоны и ультрарелятивистские частицы, а также нейтрино. Поэтому говорят, что эффективная масса электронов и дырок в графене вблизи точки соприкосновения зон равна нулю. Но здесь стоит заметить, что, несмотря на сходство фотонов и безмассовых носителей, в графене существует несколько существенных различий, делающих носители в графене уникальными по своей физической природе, а именно: электроны и дырки являются фермионами, и они заряжены. В настоящее время аналогов для этих безмассовых заряженных фермионов среди известных элементарных частиц нет.

Несмотря на такие специфические особенности, экспериментального подтверждения эти выводы не получили до 2005 года, поскольку не удавалось создать графен. Кроме того, ещё раньше было доказано теоретически, что свободную идеальную двумерную плёнку получить невозможно из-за нестабильности относительно сворачивания или скручивания. Тепловые флуктуации приводят к плавлению двумерного кристалла при любой конечной температуре [45].

Интерес к графену появился снова после открытия углеродных нанотрубок, поскольку вся первоначальная теория строилась на простой модели нанотрубки как развёртки цилиндра. Поэтому теория для графена в приложении к нанотрубкам хорошо проработана.

Попытки получения графена, прикрепленного к другому материалу, начались с экспериментов, использующих простой карандаш, и продолжились с использованием атомно-силового микроскопа¹ для механического удаления слоёв графита, но не достигли успеха. Использование графита с внедрёнными (интеркалированный графит) в межплоскостное пространство чужеродными атомами (используется для увеличения расстояния между соседними слоями и их расщепления) также не привело к результату.

В 2004 году русскими учёными была опубликована работа в журнале Science, где сообщалось о получении графена на подложке окисленного кремния. Таким образом, стабилизация двумерной плёнки достигалась благодаря наличию связи с тонким слоем диэлектрика SiO_2 по аналогии с тонкими плёнками, выращенными с помощью МПЭ. Впервые были измерены проводимость, эффект Шубникова — де Гааза, эффект Холла для образцов, состоящих из плёнок углерода с атомарной толщиной.

Метод отшелушивания является довольно простым и гибким, поскольку позволяет работать со всеми слоистыми кристаллами, то есть теми материалами, которые представляются как слабо (по сравнению с силами в плоскости) связанные слои двумерных кристаллов. В последующей работе авторы показали, что его можно использовать для получения других двумерных кристаллов: BN, MoS_2 , NbSe_2 , $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$.

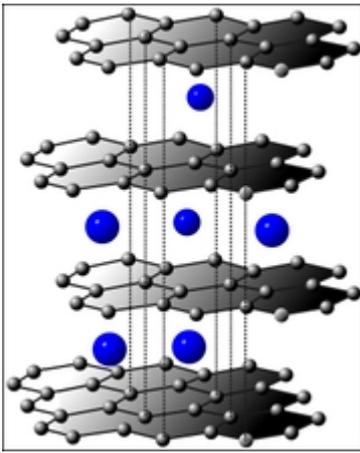


Рис. 2. Слои интеркалированного графита можно легко отделить друг от друга. Кусочки графена получают при механическом воздействии на высокоориентированный пиролитический графит или киш-графит. Сначала тонкие слои графита помещают между липкими лентами и отщепляют раз за разом тонкие слои графита, пока не будет получен достаточно тонкий слой (среди многих плёнок могут попадаться и однослойные, которые и представляют интерес). После отшелушивания скотч с тонкими плёнками графита и графена прижимают к подложке окисленного кремния. При этом трудно получить плёнку определённого размера и формы в фиксированных частях подложки (горизонтальные размеры плёнок составляют обычно около 10 мкм). Найденные с помощью оптического микроскопа (они слабо видны при толщине диэлектрика 300 нм) плёнки подготавливают для измерений. С помощью атомно-силового микроскопа определяют реальную толщину плёнки графита (она может варьироваться в пределах 1 нм для графена). Используя электронную литографию и реактивное плазменное травление, задают форму плёнки для электрофизических измерений (холловский мост для магнитотранспортных измерений).

Кусочки графена также можно приготовить из графита, используя химические методы. Для начала микрокристаллы графита подвергаются действию смеси серной и соляной кислот. Графит окисляется, и на краях образца появляются карбоксильные группы графена. Их превращают в хлориды при помощи тионилхлорида. Затем под действием октадециламина в растворах тетрагидрофурана, тетрахлорметана и дихлорэтана они переходят в графеновые слои толщиной 0,54 нм. Этот химический метод не единственный, и, меняя органические растворители и химикаты, можно получить нанометровые слои графита.

В литературе описан также химический метод получения графена, встроенного в полимерную матрицу. Следует упомянуть ещё два метода: радиочастотное плазмохимическое осаждение из газовой фазы (англ. PECVD), рост при высоком давлении и температуре (англ. HPHT). Из этих методов только последний можно использовать для получения плёнок большой площади.

Если кристалл пиролитического графита и подложку поместить между

электродами, то, как показано в работе, можно добиться того, что кусочки графита с поверхности, среди которых могут оказаться плёнки атомарной толщины, под действием электрического поля могут перемещаться на подложку окисленного кремния. Для предотвращения пробоя (между электродами прикладывали напряжение от 1 до 13 кВ) между электродами также помещали тонкую пластину слюды.

Существует также несколько сообщений, посвящённых получению графена, выращенного на подложках карбида кремния SiC(0001). Графитовая плёнка формируется при термическом разложении поверхности подложки SiC (этот метод получения графена гораздо ближе к промышленному производству), причём качество выращенной плёнки зависит от того, какая стабилизация у кристалла: C-стабилизированная или Si-стабилизированная поверхность — в первом случае качество плёнок выше. Та же группа исследователей показала, что, несмотря на то, что толщина слоя графита составляет больше одного монослоя, в проводимости участвует только один слой в непосредственной близости от подложки, поскольку на границе SiC-C из-за разности работ выхода двух материалов образуется нескомпенсированный заряд. Свойства такой плёнки оказались эквивалентны свойствам графена.

Дефекты. Идеальный графен состоит исключительно из шестиугольных ячеек. Присутствие пяти- и семиугольных ячеек будет приводить к различного рода дефектам.

Наличие пятиугольных ячеек приводит к сворачиванию атомной плоскости в конус. Структура с 12 такими дефектами одновременно известна под названием фуллерен. Присутствие семиугольных ячеек приводит к образованию седловидных искривлений атомной плоскости. Комбинация этих дефектов и нормальных ячеек может приводить к образованию различных форм поверхности.

Проводимость. Теоретически показано, что основное ограничение на подвижность электронов и дырок в графене (на Si подложке) возникает из-за заряженных примесей в диэлектрике (SiO₂), поэтому сейчас ведутся работы по получению свободновисящих плёнок графена, что должно увеличить подвижность до $2 \times 10^6 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$. В настоящее время максимальная достигнутая подвижность составляет $2 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$; она была получена в образце, подвешенном над слоем диэлектрика на высоте 150 нм (часть диэлектрика была удалена с помощью жидкостного травителя). Образец с толщиной в один атом поддерживался при помощи широких контактов. Для улучшения подвижности образец подвергался очистке от примесей на поверхности посредством пропускания тока, который нагревал весь образец до 900 К в высоком вакууме.

Идеальную двумерную плёнку в свободном состоянии нельзя получить из-за её термодинамической нестабильности. Но если в плёнке будут дефекты или она будет деформирована в пространстве (в третьем измерении), то такая «неидеальная» плёнка может существовать без контакта с подложкой. В эксперименте [31] с использованием просвечивающего электронного микроскопа было показано, что свободные плёнки графена существуют и

образуют поверхность сложной волнистой формы, с латеральными размерами пространственных неоднородностей около 5—10 нм и высотой 1 нм. В статье [45] было показано, что можно создать свободную от контакта с подложкой плёнку, закреплённую с двух краёв, образуя, таким образом, наноэлектромеханическую систему. В данном случае подвешенный графен можно рассматривать как мембрану, изменение частоты механических колебаний которой предлагается использовать для детектирования массы, силы и заряда, то есть использовать в качестве высокочувствительного сенсора.

Подложка кремния с диэлектриком, на котором покоится¹ графен, должна быть сильно легирована, чтобы её можно было использовать в качестве обратного затвора, при помощи которого можно управлять концентрацией и даже изменять тип проводимости. Поскольку графен является полуметаллом, то приложение положительного напряжения к затвору приводит к электронной проводимости графена, и напротив — если приложить отрицательное напряжение, то основными носителями станут дырки, поэтому в принципе нельзя обеднить полностью графен от носителей. Заметим, что если графит состоит из нескольких десятков слоёв, то электрическое поле достаточно хорошо экранировано, как и в металлах, огромным количеством носителей в полуметалле.

В идеальном случае, когда отсутствует легирование и затворное напряжение равно нулю, не должно быть носителей тока, что, если следовать наивным представлениям, должно приводить к отсутствию проводимости. Но как показывают эксперименты и теоретические работы, вблизи дираковской точки или точки электронейтральности для дираковских фермионов существует конечное значение проводимости, хотя величина минимальной проводимости зависит от метода расчёта. Эта идеальная область не изучена просто потому, что нет достаточно чистых образцов. В действительности все плёнки графена соединены с подложкой, и это приводит к неоднородностям, флуктуациям потенциала, что ведёт к пространственной неоднородности типа проводимости по образцу, поэтому даже в точке электронейтральности концентрация носителей теоретически не меньше чем 10^{12} см⁻². Здесь проявляются отличие от обычных систем с двумерным электронным или дырочным газом, а именно отсутствует переход металл-диэлектрик.

Возможные применения графена. Считается, что на основе графена можно сконструировать баллистический транзистор. В марте 2006 года группа исследователей из технологического института штата Джорджии заявила, что ими был получен полевой транзистор на графене, а также квантово-интерференционный прибор. Исследователи полагают, что благодаря их достижениям в скором времени появится новый класс графеновой наноэлектроники с базовой толщиной транзисторов до 10 нм. Данный транзистор обладает большим током утечки, то есть нельзя разделить два состояния с закрытым и открытым каналом.

Использовать напрямую графен при создании полевого транзистора без токов утечки не представляется возможным благодаря отсутствию запрещённой

зоны в этом материале, поскольку нельзя добиться существенной разности в сопротивлении при любых приложенных напряжениях к затвору, то есть не получается задать два состояния пригодных для двоичной логики: проводящее и непроводящее. Сначала нужно создать каким-нибудь образом запрещённую зону достаточной ширины при рабочей температуре (чтобы термически возбуждённые носители давали малый вклад в проводимость). Один из возможных способов предложен в работе. В этой статье предлагается создать тонкие полоски графена с такой шириной, чтобы благодаря квантово-размерному эффекту ширина запрещённой зоны была достаточной для перехода в диэлектрическое состояние (закрытое состояние) прибора при комнатной температуре (28 мэВ соответствует ширине полоски 20 нм). Благодаря высокой подвижности (имеется в виду, что подвижность выше чем в кремнии, используемом в микроэлектронике) $10^4 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ быстродействие такого транзистора будет заметно выше. Несмотря на то, что это устройство уже способно работать как транзистор, затвор к нему ещё не создан.

Другая область применения предложена в статье и заключается в использовании графена в качестве очень чувствительного сенсора для обнаружения отдельных молекул химических веществ, присоединённых к поверхности плёнки. В этой работе исследовались такие вещества, как NH_3 , CO , H_2O , NO_2 . Сенсор размером 1 мкм \times 1 мкм использовался для детектирования присоединения отдельных молекул NO_2 к графену. Принцип действия этого сенсора заключается в том, что разные молекулы могут выступать как доноры и акцепторы, что в свою очередь ведёт к изменению сопротивления графена. Теоретически исследовалось влияние различных примесей на проводимость графена. Было показано, что NO_2 молекула является хорошим акцептором из-за своих парамагнитных свойств, а диамагнитная молекула N_2O_4 создаёт уровень близко к точке электронейтральности. В общем случае примеси, молекулы которых имеют магнитный момент (неспаренный электрон), обладают более сильными легирующими свойствами.

Ещё одна перспективная область применения графена — его использование для изготовления электродов в ионисторах (суперконденсаторах) для использования их в качестве перезаряжаемых источников тока. Опытные образцы ионисторов на графене имеют удельную энергоёмкость 32 Вт·ч/кг, сравнимую с таковой для свинцово-кислотных аккумуляторов (30–40 Вт·ч/кг)

Квантовый эффект Холла в графене или необычный квантовый эффект Холла — эффект квантования холловского сопротивления или проводимости двумерного электронного газа или двумерного дырочного газа в сильных магнитных полях в графене. Этот эффект был предсказан теоретически и подтверждён экспериментально в 2005 году [45].

Уровни Ландау в графене описываются уравнением Дирака для графена с учётом магнитного поля, которое можно записать в виде

$$[\vec{\sigma} \cdot (i\hbar v_F \vec{\nabla} + e\vec{A}/c)]\psi(x, y) = \varepsilon\psi(x, y)$$

где использована калибровка Ландау для векторного потенциала $A = (By, 0)$, а $\vec{\sigma}$ матрицы Паули (σ_1, σ_2). В матричном виде уравнение запишется в виде

$$\begin{pmatrix} 0 & -i\hbar v \frac{\partial}{\partial x} - \hbar v \frac{\partial}{\partial y} + eBy \\ -i\hbar v_F \frac{\partial}{\partial x} + \hbar v \frac{\partial}{\partial y} + eBy & 0 \end{pmatrix} \psi(x, y) = \varepsilon \psi(x, y).$$

Здесь можно легко разделить переменные и в итоге прийти к спектру для релятивистских уровней Ландау

$$\varepsilon_n = \pm \hbar \omega_c \sqrt{n} = \pm \sqrt{\hbar v_F^2 e B 2n / c},$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$

Впервые необычный (англ. unconventional) квантовый эффект Холла наблюдали в 2005 году, Было показано, что носители в графене действительно обладают нулевой эффективной массой, поскольку положения плато на зависимости недиагональной компоненты тензора проводимости соответствовали полуцелым значениям холловской проводимости в единицах $4e^2/h$: $\nu = \pm (|n| + 1/2)$ (множитель 4 появляется из-за четырёхкратного вырождения энергии), то есть

$$\sigma_{xy} = \pm \frac{4e^2}{h} \left(|n| + \frac{1}{2} \right).$$

Это квантование согласуется с теорией квантового эффекта Холла для дираковских безмассовых фермионов. Если уровень Ферми находится между уровнями Ландау, то на зависимости холловской проводимости σ_{xy} наблюдается ряд плато. Эта зависимость отличается от обычных двумерных систем (аналогом может служить двумерный электронный газ в кремнии, который является двухдолинным полупроводником в плоскостях эквивалентных $\{100\}$, то есть тоже обладает четырёхкратным вырождением уровней Ландау и холловские плато наблюдаются при $\nu = 4 |n|$).

Квантовый эффект Холла может использоваться как эталон сопротивления, потому что численное значение наблюдаемого в графене плато равно $h / 2e^2$ выполняется с хорошей точностью, хотя качество образцов уступает высокоподвижному ДЭГ в GaAs, и, соответственно, точности квантования. Преимущество наблюдения квантового эффекта Холла в графене заключается в том, что он наблюдается при комнатной температуре (в магнитных полях свыше 20 Т). Основное ограничение на наблюдение квантового эффекта Холла при комнатной температуре накладывает не само размытие распределения Ферми-Дирака, а рассеяние носителей на примесях, что приводит к уширению уровней Ландау.

Из-за отсутствия запрещённой зоны в графене в структурах с верхним затвором можно сформировать непрерывный p-n переход, когда напряжение на верхнем затворе позволяет инвертировать знак носителей, задаваемый обратным затвором в графене, где концентрация носителей никогда не обращается в ноль (кроме точки электронейтральности) и нет области лишённой носителей как в обычных p-n переходах. В таких структурах тоже можно наблюдать квантовый эффект Холла, но из-за неоднородности знака носителей значения холловских плато отличаются от приведённых выше.

Для структуры с одним p-n переходом значения квантования холловской проводимости описываются формулой:

$$G = \frac{2e^2}{h} \frac{|\nu'| |\nu|}{|\nu'| + |\nu|},$$

где ν и ν' — факторы заполнения в n- и p- области соответственно (p-область находится под верхним затвором), которые могут принимать значения $\pm 2, \pm 6, \pm 10$ и т. д. Тогда плато в структурах с одним p-n переходом наблюдаются при значениях 1, 3/2, 2, и т. д. Такие значения плато были наблюдаены в эксперименте.

r-n-r переход. Для структуры с двумя r-n переходами соответствующие значения холловской проводимости равны

$$G = \frac{e^2}{h} \frac{|\nu'| |\nu|}{2|\nu'| + |\nu|} = \frac{2}{3}, \frac{6}{5}, \frac{6}{7}, \dots (\nu\nu' < 0).$$

Наблюдалось также спиновое расщепление релятивистских уровней Ландау и снятие четырёхкратного вырождения для наинизшего уровня Ландау вблизи точки электронейтральности. Для объяснения этого эффекта предложено несколько теорий

Осцилляции Шубникова — де Гааза в графене впервые наблюдали в 2005 году. Эффект заключается в периодическом изменении сопротивления или проводимости электронного или дырочного газа как функции обратного магнитного поля. Он связан с осциллирующим поведением плотности состояний в магнитном поле

Энергия дираковских безмассовых фермионов в магнитном поле пропорциональна корню из магнитного поля и при заполнении s и s+1 релятивистских уровней Ландау можно записать для электронов на уровне Ферми (ε_F) следующие соотношения

$$\varepsilon_F = \hbar\omega_c^s \sqrt{s}$$

$$\varepsilon_F = \hbar\omega_c^{s+1} \sqrt{s+1}$$

где s — натуральное число 1, 2, 3, ... Концентрация электронов без магнитного поля равна

$$n = \frac{g_s g_v \varepsilon_F^2}{4\pi\hbar^2 v_F^2}.$$

Используя это соотношение при условии, что магнитное поле не изменяет уровень Ферми (например он зафиксирован по внешним причинам) получим

$$\pi\hbar^2 n = \frac{\varepsilon_F^2}{v_F^2} = 2seB_s \hbar$$

или

$$s = \frac{\pi\hbar n}{2eB_s}$$

$$s + 1 = \frac{\pi\hbar n}{2eB_{s+1}}$$

Вычитая из последнего равенства предпоследнее найдём соотношение для

периода осцилляций ΔB_s^{-1}

$$1 = \frac{\pi \hbar n}{2e} \left(\frac{1}{B_{s+1}} - \frac{1}{B_s} \right) = \frac{\pi \hbar n}{2e} \Delta B_s^{-1}$$

Здесь можно определить концентрацию носителей через период

$$n = \frac{2e}{\pi \hbar \Delta B_s^{-1}}$$

или фундаментальную частоту B_F

$$n = \frac{2e}{\pi \hbar} B_F.$$

Эта формула аналогична формуле для концентрации двумерного электронного газа в инверсионных слоях кремния (100).

В [10] показано, что осциллирующую часть продольной компоненты тензора проводимости можно записать в виде

$$\sigma_{osc} = \frac{4e^2 |\mu| (\mu^2 - \Delta^2 + \Gamma^2) \Theta(\mu^2 - \Delta^2 - \Gamma^2)}{\pi (\hbar v_F^2 e B)^2 + (2\mu\Gamma)^2} \sum_{k=1}^{\infty} \cos \left(\frac{\pi k (\mu^2 - \Delta^2 - \Gamma^2)}{\hbar v_F^2 e B} \right) R_T(k),$$

где μ — химический потенциал, Δ — ширина запрещённой зоны (в случае графена равна нулю), Γ — ширина уровня Ландау (не зависит от магнитного поля и температуры), $\Theta(x)$ — ступенчатая функция, амплитудный температурный множитель равен

$$R_T(k, \mu) = \frac{2\pi^2 k T \mu / \hbar v_F^2 e B}{\sinh(2\pi^2 k T \mu / \hbar v_F^2 e B)},$$

а множитель Дингля

$$R_D(k, \mu) = \exp \left(\frac{-2\pi k |\mu| \Gamma}{\hbar v_F^2 e B} \right).$$

Формула описывает осцилляции Шубникова — де Гааза не очень близко к точке электронейтральности. В окрестностях самой точки осцилляции магнетопроводимости отсутствуют. При больших концентрациях носителей можно пренебречь шириной запрещённой зоны и уширением уровней Ландау ($\mu^2 \gg \Delta^2 + \Gamma^2$) и частота осцилляций по обратному магнитному полю совпадает с формулой полученной ранее.

Парадокс Клейна в графене — прохождение любых потенциальных барьеров без обратного рассеяния под прямым углом. Эффект связан с тем, что спектр носителей тока в графене линейный и квазичастицы подчиняются уравнению Дирака для графена. Эффект предсказан теоретически для прямоугольного барьера, но экспериментально не наблюдался.

Рассмотрим часть гамильтониана:

$$H_0^k = -i\hbar v \sigma \nabla$$

Матрицы Паули здесь не имеют отношения к спину электрона, а отражают вклад двух подрешёток в формирование двухкомпонентной волновой функции частицы. Матрицы Паули являются операторами псевдоспина по аналогии со спином электрона. Данный гамильтониан полностью

эквивалентен гамильтониану для нейтрино, и, как и для нейтрино, существует сохраняющаяся величина проекции спина (псевдоспина для частиц в графене) на направление движения — величина, называемая спиральностью (хиральностью). Для электронов хиральность положительна, а для дырок — отрицательна. Сохранение хиральности в графене приводит к такому явлению, как парадокс Клейна. В квантовой механике с этим явлением связано нетривиальное поведение коэффициента прохождения релятивистской частицей потенциальных барьеров, высота которых больше, чем удвоенная энергия покоя частицы. Частица более легко преодолевает более высокий барьер. Для частиц в графене можно построить аналог парадокса Клейна с той разницей, что не существует массы покоя. Можно показать, что электрон преодолевает с вероятностью, равной единице, любые потенциальные барьеры при нормальном падении на границу раздела. Если падение происходит под углом, то существует некоторая вероятность отражения. Например, обычный р-п переход в графене является таким преодолемым барьером. В целом парадокс Клейна приводит к тому, что частицы в графене трудно локализовать, что в свою очередь приводит, например, к высокой подвижности носителей в графене. Недавно были предложены несколько моделей, позволяющих локализовать электроны в графене. В работе впервые продемонстрирована квантовая точка из графена и измерена кулоновская блокада при 0,3 К.

3.4. Управление квантовыми системами. Нобелевская премия 2012 года.

В течение 2012 года большая часть физического сообщества не сомневалась, Нобелевская премия за этот год будет присуждена первооткрывателям бозона Хиггса. *(При том, что в существовании самого бозона Хиггса многие не сомневались с работ П.Хиггса 1964 года или немногим более поздних работ А.Салама и С.Вейнберга, удостоенных Нобелевской премии по физике за 1974 год).* Однако, 9 октября 2012 года Нобелевский комитет объявил о присуждении Нобелевской премии по физике Сержу Арошу и Дэвиду Вайнленду за «прорывные экспериментальные методы, которые сделали возможными измерение отдельных квантовых систем и управление ими».

Серж Арош родился 11 сентября 1944 года в Касабланке, Марокко. Мать сержа — уроженка Одессы Валентина Арош (урождённая Рублёва, 1921—1998) — работала учительницей, отец — Альбер Арош (1920—1998, родом из Марракеша) — был адвокатом. Его бабушка и дедушка (Исаак и Эстер Арош) возглавляли школу Всемирного еврейского союза *École de l'Alliance Israélite*. Бабушка и дедушка по материнской линии, врачи Александр Рублёв и София Фромштейн, покинув в начале 1920-х годов СССР поселились в Париже, а оттуда перебрались в Касабланку. Когда Сержу было 12 лет, Марокко провозгласило независимость, и его семья переехала во французскую метрополию. Арош в Политехнической школе, Высшей нормальной школе и Парижском университете (1963—1967). В 1971 году под руководством Клода Коэна-Таннуджи защитил диссертацию в Университете Пьера и Марии Кюри. Арош работал научным сотрудником Национального центра научных

исследований (CNRS, 1967—1975), затем на протяжении года стажировался в Стэнфордском университете в группе Артура Шавлова. В 1975 году он был назначен профессором Университета Пьера и Марии Кюри. В 1974—1984 годах преподавал также в парижской Политехнической школе. В 1994—2000 годах возглавлял отделение физики Высшей нормальной школы.

С 2001 года — профессор Коллеж де Франс, где он заведует кафедрой квантовой механики (с сентября 2012 года также администратор колледжа). Серж Арош является членом Французского, Европейского и Американского физических обществ.

В 2012 году Серж Арош совместно с Дэвидом Уайнлендом был удостоен Нобелевской премии по физике за "создание прорывных технологий манипулирования квантовыми системами, которые сделали возможными измерение отдельных квантовых систем и управление ими".

Американский физик Дэвид Джефффри Уайнленд (David Jeffrey Wineland) родился в Милуоки, штат Висконсин, США.

В 1961 году закончил школу Энсина в Сакраменто, Калифорния. Физику изучал сначала в Калифорнийском университете в Беркли, потом в Гарвардском университете, где и защитил диссертацию в 1970 году, его диссертация была посвящена лазерам на атомарном дейтерии. Его научным руководителем был Норман Рамзей. Некоторое время Уайнленд вел научные исследования в Вашингтонском университете в группе Ханса Георга Демельта, а в 1975 году перешел на работу в Национальное бюро стандартов в Боулдере, штат Колорадо. Именно там он выполнил свои основные эксперименты. Сферой его исследований являлась оптика и, в частности, лазерное охлаждение ионов в квадрупольных ионных ловушках с последующим использованием захваченных ионов для выполнения квантовых вычислений. Там он трудится и сегодня, только учреждение это в 1988 году было переименовано и называется теперь Национальным институтом стандартов и технологий. Параллельно 68-летний профессор Уайнленд преподает в Колорадском университете.

Также Уайнленд является членом Американского физического общества и Американского оптического общества. В 1992 году он был избран членом Национальной академии наук США. В 2012 году Дэвид Уайнленд совместно с Сержем Арошем был удостоен Нобелевской премии по физике за "создание прорывных технологий манипулирования квантовыми системами, которые сделали возможными измерение отдельных квантовых систем и управление ими".[45,48]

Иногда бывает так, что Нобелевскую премию присуждают за единственное, одномоментно сделанное открытие, которое было удачной догадкой или гениальным прозрением. Однако далеко не всегда революция в физике происходит так «легко»; чаще оказывается, что трудности встают на пути к цели одна за другой, и каждый раз приходится совершать новый прорыв. Именно такое описание в полной мере относится к работам

лауреатов Нобелевской премии по физике за 2012 год — француза Сержа Ароша (Serge Haroche) и американца Дэвида Вайнленда (David Wineland). Они сыграли ключевую роль в грандиозном достижении экспериментальной физики последних десятилетий — контроле над квантовым состоянием отдельных элементарных частиц. Однако сделано это было не сразу, а в несколько ключевых этапов, растянувшихся на треть века и завершившихся громкими результатами (включая и практические приложения) обоих лауреатов буквально в последние годы.

Любопытно подчеркнуть несколько интересных моментов, объединяющих исследования Ароша и Вайнленда. Арош работает с квантовыми состояниями одиночных фотонов, пойманных в резонатор и надолго «отцепленных» от внешнего мира. Вайнленд работает с квантовыми состояниями одиночных ионов, пойманных в ловушку и тоже изолированных от хаотического внешнего воздействия. Но при этом Арош использует атомы, чтобы наблюдать за состоянием фотона, а Вайнленд использует фотоны, чтобы манипулировать состояниями ионов. Оба метода позволяют осуществить экспериментально то, что еще полвека назад могло считаться лишь «мысленным экспериментом», а также изучить то, как соотносятся друг с другом квантовый и классический мир. И наконец, Арош и Вайнленд — давние и хорошие друзья.

Сверхдобротные резонаторы. Исследования Сержа Ароша относятся к квантовой оптике — разделу физики, изучающему квантовые свойства отдельных фотонов, «элементарных кусочков» света. Обычно фотоны используются лишь как одноразовые «посыльные» — они излучаются в источнике, летят к фотодетектору и там поглощаются. Если с ними что-то произошло в пути, то мы об этом узнаем лишь после их «смерти». Жизнь такого фотона быстротечна, его нельзя долго держать и изучать. А Серж Арош задался именно этой целью — научиться удерживать единичный фотон достаточно долго внутри экспериментальной установки и в течение этого времени его аккуратно исследовать.

Удержать фотон в принципе можно, заставив его метаться туда-сюда между двумя вогнутыми зеркалами сверхвысокого качества (вогнутость зеркал не позволяет фотону уйти в сторону). Правда, фраза «метаться туда-сюда» не совсем точно отражает ситуацию. Когда длина световой волны сравнима с расстоянием между зеркалами, фотон уже не перемещается между зеркалами, а, как бы дрожа, замирает между ними — получается стоячая световая волна, опирающаяся на зеркала. Такая система зеркал называется резонатором (в англоязычной литературе используется термин *cavity* «полость»).

Качество удержания фотона характеризуется добротностью резонатора, Q . Это число показывает, грубо говоря, сколько раз фотон отразится от зеркал, прежде чем как-то пролезет наружу (или, более аккуратно, во сколько раз время удержания фотона больше периода колебания световой волны). Ясно, что добротность критически зависит от отражательной способности зеркал: чем ближе коэффициент отражения к единице, тем выше добротность.

В микроволновом диапазоне (длины волн порядка миллиметров или сантиметров) благодаря применению сверхпроводников удается добиться исключительно хорошего отражения. Уже в 70-80-х годах в распоряжении физиков были резонаторы с добротностью в миллионы, а сейчас она уже достигает десятков миллиардов (рис. 2). В таком резонаторе микроволновой фотон будет «жить» десятые доли секунды — огромный промежуток времени для современной экспериментальной физики. За это время можно, не торопясь, и породить фотон, и воздействовать на него, и «просканировать» его состояние (как это сделать, будет рассказано ниже). Главное, фотоны перешли в категорию «частиц», долго живущих внутри экспериментальной установки, «частиц», над которыми уже можно проводить разнообразные опыты.

Квантовая электродинамика в резонаторе

И вот тут в этой истории появляется «вираж», очень характерный для современной физики. Создание высокодобротных резонаторов — такое, казалось бы, совершенно техническое достижение — открыло перед физиками новый раздел фундаментальной физики — квантовую электродинамику резонатора (по-английски *cavity quantum electrodynamics*, *CQED*). Это позволило поставить такие опыты с фотонами, которые буквально «прощупывали» самые основы квантовой физики и позволяли по-новому изучать загадочный переход между квантовым и классическим поведением частиц.

Один из ярких примеров таких экспериментов, выполненный в группе Сержа Ароша, — экспериментальная демонстрация того, что время жизни единичного возбужденного атома можно сильно изменить, поместив его в такой резонатор.

Постановка опыта проста, а результат, на неискушенный взгляд, просто удивительный. Между двумя зеркалами пустого резонатора (то есть без фотонов внутри) пролетает атом, находящийся в возбужденном состоянии. Вообще, возбужденные атомы нестабильны, и через небольшое время электрон в нём прыгает на более низкий уровень, излучая при этом фотон. Казалось бы, это спонтанное излучение — сугубо внутриатомный процесс, и время жизни возбужденного состояния — собственная характеристика атома. Однако оказывается, что пролетая сквозь пустой резонатор, атом может ускорить или, наоборот, замедлить процесс «высвечивания» фотона!

Возбужденный атом при этом находится в пустоте, его никто не «трогает» (стенки резонатора удалены от атома на сантиметр!), мы на него не воздействуем никакими внешними электромагнитными полями. Мы всего лишь ограничиваем вакуум вокруг него — и этого уже достаточно, чтобы помешать или, наоборот, поспособствовать излучению фотона.

С точки зрения житейской интуиции — ситуация совершенно необыкновенная. Мы привыкли, что результат может вызвать только прямое воздействие на объект: либо через непосредственное соприкосновение с ним,

либо через силовые поля. А тут получается так, словно мы запрещаем или «поощряем» распад, вообще не воздействуя на атом!

Разгадка этого кажущегося парадокса состоит в том, что квантовые объекты нелокальны, неточечны. Конкретно, когда атом излучает фотон, то этот фотон вовсе не вылетает *прямо* из атома. Оптический фотон вообще невозможно локализовать с атомной точностью. Именно поэтому атомы и молекулы не видны в оптический микроскоп, а также именно поэтому бессмысленно спрашивать, например, из какой части сложной молекулы (скажем, молекулы красителя) вылетает фотон при излучении. Фундаментальная причина этого состоит в том, что электромагнитное взаимодействие довольно слабо, так что постоянная тонкой структуры — маленькая величина.

Правильнее процесс излучения представлять себе так, словно фотон появляется сразу в некотором объеме вокруг атома и затем расширяется во все стороны. Этот объем на порядки больше, чем объем самого атома, и он увеличивается еще больше при увеличении длины волны фотона, то есть при уменьшении разницы между энергетическими уровнями, между которыми произошел переход. Поэтому если какие-то посторонние предметы находятся в этом объеме, за которые может «зацепиться» будущий фотон, то они могут изменять скорость его излучения.

В опытах Ароша использовались особые, сильновозбужденные атомы (это так называемые ридберговские состояния атома). В них разница между энергетическими уровнями, между которыми идет переход, так мала, что длина волны излученного фотона составляет вполне макроскопическое значение — миллиметры и сантиметры. Хотя атом сам по себе и крошечный, но когда он «пытается» излучить фотон, он «прощупывает обстановку» в сантиметровом объеме.

Резонатор, использованный Арошем, был сопоставимого размера, и это позволяло ему влиять на скорость распада. Например, в совсем маленьком резонаторе излученный фотон просто не поместился бы — и уже один этот факт предотвращает его излучение, стабилизирует возбужденное состояние. Если же размер резонатора подобрать так, чтоб фотон ровненько в него вписывался, то атому будет даже удобнее излучить такой фотон, вероятность излучения резко возрастает.

Справедливости ради надо сказать, что этот эффект вовсе не был для физиков сюрпризом. Такое поведение было теоретически предсказано Эдвардом Пёрселлом еще в 1946 году, а первые экспериментальные намеки на такое поведение появились в начале 70-х годов. Правда, тогда речь шла об излучении молекул, расположенных между двумя плоскими зеркалами, и эффект был довольно «грязным». Серж Арош и его сотрудники добились гораздо более сильного и чистого эффекта: в их статье 1983 года сообщается о примерно пятисоткратном (!) ускорении излучения фотона. Еще раз почувствуйте изюминку: свечение усилилось только за счет того, что мы правильным способом ограничили пространство в вакууме вокруг излучателя!

Спустя четыре года эффект был продемонстрирован сразу несколькими исследовательскими группами и в оптическом диапазоне, причем как в сторону усиления, так и ослабления излучения в десятки раз. Без преувеличения можно сказать, что началась эпоха манипулирования темпами внутриатомных процессов. А группа Сержа Ароша тем временем двинулась дальше...

Подсчет фотонов и фейерверк результатов

Когда речь идет об экспериментах с одной или несколькими частицами, возникает естественный вопрос: как можно измерить количество частиц? Для электронов, скажем, ответ простой: надо измерить электрический заряд объекта и поделить на заряд одного электрона. А как измерить, сколько фотонов «застряло» между зеркалами резонатора?

Проблема с фотонами в том, что они легко поглощаются. Если фотонов огромное число, то это несущественно — именно так измеряют напряженность классического электрического или магнитного поля пробными зарядами. Но когда фотонов мало, поглощать их нехорошо — это полностью меняет состояние измеряемого объекта. Может быть, можно без этого как-то обойтись? Оказывается, да. В квантовой механике вовсе не все измерения меняют состояние системы; существуют так называемые квантовые неразрушающие измерения (по-английски *quantum non-demolition measurements*), которые умудряются без этого обойтись (этот тип измерений, кстати, предложил советский физик Владимир Брагинский).

В 1990 году вышла статья Ароша и соавторов, в которой была предложена конкретная схема для неразрушающего измерения количества фотонов в резонаторе. Для этого авторы снова предлагают использовать специальным образом подготовленные атомы, пролетающие сквозь резонатор. Только в этот раз резонатор играет иную роль: он не приводит ни к излучению, ни к поглощению фотонов, а слегка сдвигает уровни энергии атома на величину, зависящую от количества фотонов. Сдвиг уровней энергии (который присутствует только во время пролета сквозь резонатор) слегка изменяет состояние атома на выходе, измерив которое, можно «сосчитать фотоны».

Реализация этой идеи, однако, натолкнулась на серьезные технические трудности, которые были преодолены лишь в 2007 году. Зато потом, в считанные месяцы, группа Ароша выполнила несколько блестящих исследований, позволивших по-новому взглянуть на основополагающие квантовые явления.

- Март 2007 года: удается проследить появление и исчезновение отдельного фотона в резонаторе.
- Август 2007 года: постепенный «коллапс» семифотонного начального состояния, в котором видно, как на протяжении полусекунды фотоны один за другим исчезают из резонатора.
- Сентябрь 2008 года: наблюдение состояний типа «кота Шрёдингера», когда в резонаторе находится не какое-то определенное количество фотонов, а суперпозиция трехфотонного и четырехфотонного состояния.

- Октябрь 2008 года: наблюдение квантового эффекта Зенона в резонаторе (квантовый эффект Зенона состоит в том поразительном свойстве квантовой механики, что непрерывное наблюдение за распадающейся системой «замораживает» ее распад).

Настоящий фейерверк результатов! Группа Ароша, разумеется, и на этом не собирается останавливаться, а открывает всё новые и новые приложения разработанных экспериментальных методов. К примеру, месяц назад вышла еще одна их статья, в которой квантовый эффект Зенона не просто наблюдается, а уже используется для ручного управления квантовой эволюцией фотонного поля в резонаторе и получения экзотических квантовых состояний электромагнитного поля.

Подводя итог под этой частью рассказа, можно вспомнить, что знаменитая дискуссия между Нильсом Бором и Альбертом Эйнштейном о физической сущности квантовой механики крутилась, среди прочего, и вокруг мысленного эксперимента с «одnofотонным ящиком». Практическая реализация такого ящика, равно как и множество более тонких квантовых манипуляций с фотонами, была в те времена попросту невозможна с технической точки зрения. Серж Арош стал ключевой фигурой, благодаря которой подобные мысленные квантовомеханические эксперименты были реализованы.

Одноатомная квантовая «хирургия»: работы Дэвида Вайнленда

Манипуляция квантовым состоянием отдельного иона — не менее трудная с технической точки зрения задача. Конечно, атомы, в отличие от фотонов, никуда не исчезают, и в этом смысле с ними работать проще. Но с другой стороны, длина волны атома (напомним, что в квантовом мире каждой частице соответствует некий волновой процесс) при его движении с обычными скоростями очень мала. Поэтому квантовые эффекты, связанные с поступательным движением (то есть перемещением атома как целого), при обычных температурах незаметны. Для того чтобы заметить квантование поступательного движения, отдельный атом или ион требуется не просто поймать, но и охладить до очень низких температур, порядка милликельвинов и ниже.

Пленение и охлаждение одиночных ионов

В принципе, технология ионных ловушек, в которых заряженные частицы удерживаются в центре переменным электромагнитным полем определенной формы, была разработана полвека назад. Она даже принесла своим создателям, Вольфгангу Паулю и Хансу Демельту, половину Нобелевской премии по физике за 1989 год (подробности см. в их нобелевских лекциях). В 1973 году Вайнленд, Экстрем и Демельт сообщили о первых экспериментах с одиночным электроном, плененным в такой ловушке. Демельт придумал для этой системы красивое название «геоний» — этаким искусственный аналог атома, в котором электрон находится в связанном состоянии с Землей (с помощью ловушки, конечно). Целью этих экспериментов было изучение внутренних характеристик электрона, в частности его аномального магнитного момента, и его сравнение с теоретическими предсказаниями

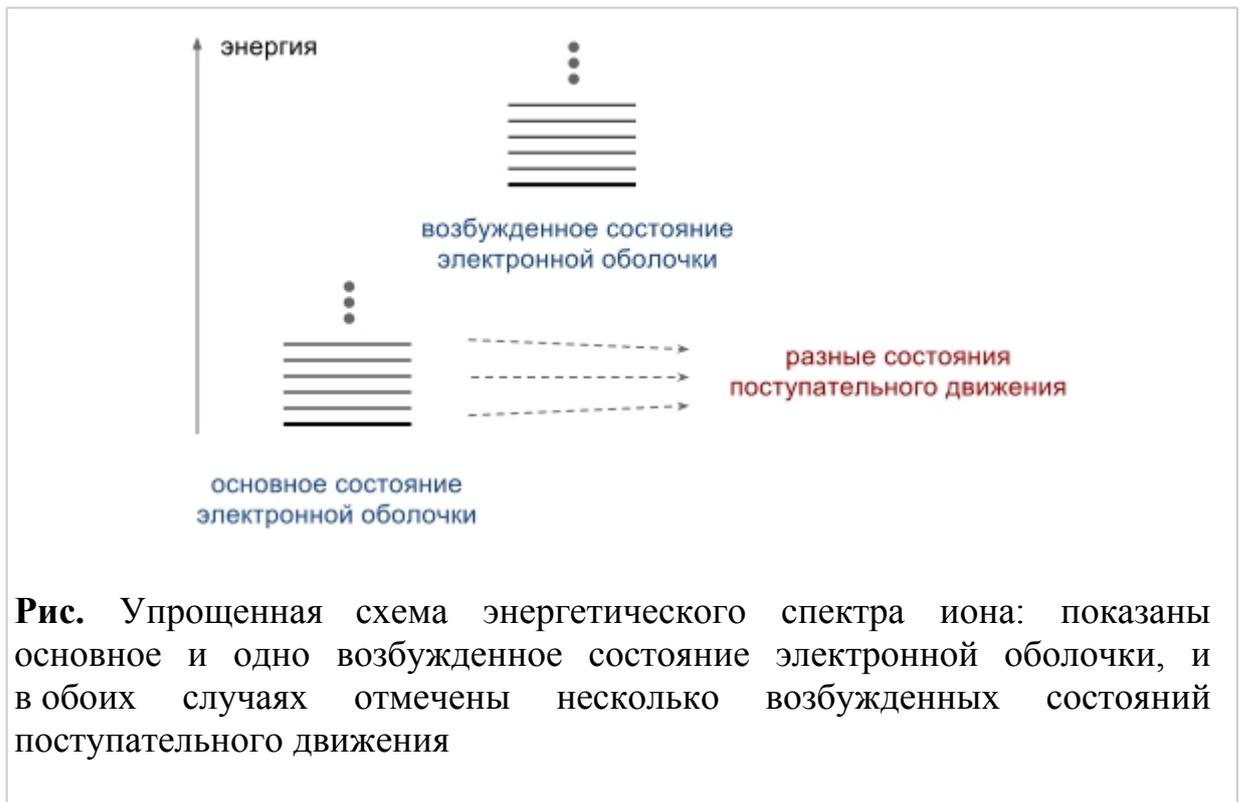
(сейчас такого типа измерения составляют целый отдельный раздел метрологии и квантовой электродинамики).

В той же статье 1973 года была упомянута и возможность поимки отдельных ионов. В отличие от одиночных электронов, ионы интересны тем, что у них есть многочисленные внутренние степени свободы, и, поймав такой ион в ловушке, можно его изучить вдоль и поперек. На пути к этой цели в 1975 году была разработана (в том числе и Вайнлендом) методика доплеровского охлаждения ионов. В этом методе на ионы или атомы светят лазерным лучом с частотой, очень близкой к резонансному рассеянию, но только те из них, которые движутся с большой скоростью навстречу световому лучу, рассеивают свет, теряют энергию и тем самым охлаждаются. Эта методика была реализована в 1978 году в экспериментах группы Вайнленда с ионами Mg⁺ и в опытах группы Тошека с ионами Ba⁺. В обоих случаях, правда, это были облачка с несколькими десятками ионов, но спустя пару лет были пойманы отдельные ионы и начато изучение их спектроскопии (работы группы Тошека 1980 года и Вайнленда—Итано 1981 года). В этих статьях было отмечено, кстати, что флуоресцентное свечение одного-единственного иона отлично видно в микроскоп.

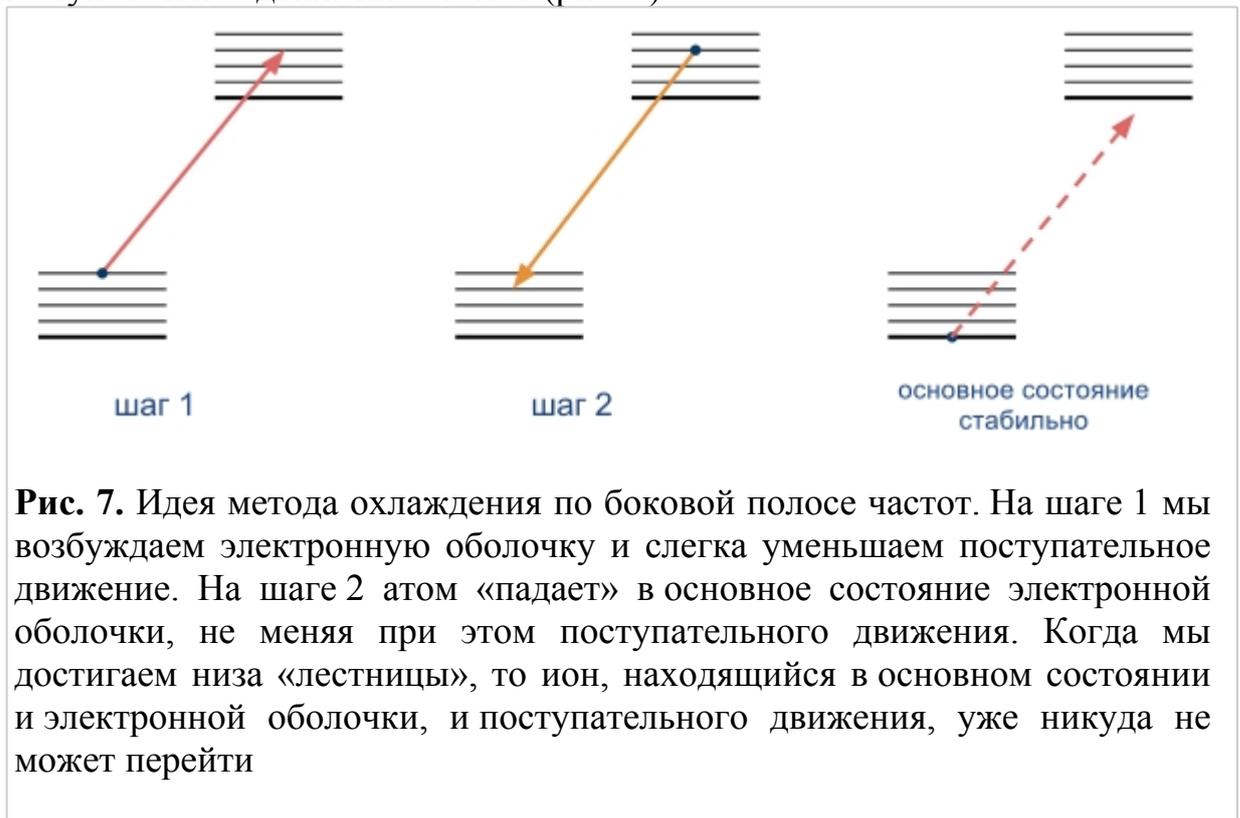
В обеих статьях 1980–1981 годов температура иона в ловушке оценивалась в несколько десятков милликельвинов, а это было всё еще многовато для того, чтобы остановить ион (точнее, перевести его в состояние с минимально возможным поступательным движением). Дальнейший прогресс в этой области был связан с новой методикой охлаждения, также разработанной и реализованной Вайнлендом, которая носит название охлаждение по боковой полосе частот (по-английски *sideband cooling*). На ней стоит остановиться подробнее.

Электронное облако в атоме или ионе имеет большой набор возможных вариантов, как ему «упаковаться» вокруг ядра и как ему организовать спины электронов. Тот вариант, который обладает наименьшей энергией, называется основным состоянием, он стабилен, а варианты с более высокой энергией (возбужденные состояния) спустя некоторое время превращаются в основное состояние с излучением фотона. Кроме того, если атом находится внутри ловушки, то его поступательное движение тоже квантуется, то есть оно тоже может иметь строго определенный вид. У этого движения есть основное состояние, при котором ион практически замирает в центре ловушки (у него остается лишь неустранимое квантовое дрожание, называемое «нулевыми колебаниями»), и целая лестница возбужденных состояний, которые отвечают перемещению туда-сюда со всё большей амплитудой. Энергия возбуждения электронной оболочки на несколько порядков больше энергии возбуждения поступательного движения, и поэтому энергетический спектр иона (в этом грубом приближении) имеет вид, показанный на рис.





Теперь самое интересное. Физики умеют перебрасывать основное состояние электронной оболочки в возбужденное, причем перебрасывать «прицельно», именно в то возбужденное состояние, которое мы хотим, — для этого надо просто посветить на атом светом с нужной длиной волны. Оказывается, эта комбинация — мы возбуждаем атом так, как нам нужно, а он выходит из этого состояния так, как «он привык», — позволяет охладить поступательное движение атомов (рис. 7).



Для этого мы берем атом или ион в основном электронном состоянии и с большим поступательным движением и перекидываем его в состояние с возбужденной электронной оболочкой (обычно это просто перевернут спин внешнего электрона), но с *чуть меньшим поступательным движением*. Атом через некоторое время высвечивает фотон и «падает» в основное состояние электронной оболочки, а поступательное движение при этом не меняется. Чистый результат этого двухшагового процесса — поступательное движение слегка уменьшилось. Повторяя эту процедуру раз за разом, мы можем совсем погасить поступательное движение, «посадив» атом в основное состояние (так что останутся только нулевые колебания). И «сев» в это состояние, атом уже не будет возбуждаться, поскольку ему просто некуда перескакивать.

В практической реализации этой идеи было, конечно, немало технических тонкостей — в частности, возбужденному атому приходилось «помогать» побыстрее снимать возбуждение, чтобы достичь нужной скорости охлаждения. Напряженная работа в течение нескольких лет позволила Вайнленду с сотрудниками их преодолеть, и в 1989 году вышла статья, рапортующая о достижении основного квантового состояния поступательного движения иона ртути. Правда, в этой статье локализация была достигнута только в поперечной плоскости, а квантованное движение вдоль оси установки было еще недоступно. Однако несколько лет спустя, в 1995 году, группа Вайнленда достигла и настоящей трехмерной локализации отдельного иона в основном квантовом состоянии.

Итак, в 1995 году завершилась — во многом благодаря достижениям группы Вайнленда — длившаяся десятилетия эпопея по полной квантовой локализации отдельного иона.

Квантовая информатика как экспериментальная наука

Как только поступательное движение иона в ловушке полностью подчинилось исследователям, сразу были реализованы необычные квантовомеханические ситуации, остававшиеся до этого чисто гипотетическими. В том же 1995 году группа Вайнленда поместила ион в состояние квантовой суперпозиции поступательного движения — когда ион не стоит на месте и не движется, а одновременно и стоит, и движется (этакая одноатомная версия «кота Шрёдингера»). Для достижения этого использовалась та же методика по перекидыванию состояний между основной и возбужденной энергетическими полосами. Вначале электронная оболочка атома переводилась из чисто основного состояния в состояние суперпозиции основного и возбужденного состояний. «Возбужденная часть» затем «падала» на основное электронное состояние, но с иным поступательным движением. В результате получалось состояние атома с электронной оболочкой в основном состоянии, но с суперпозицией поступательного движения.

Эта работа была важнейшим шагом на пути превращения физики квантовой информации из чисто теоретической в экспериментальную науку. Физики к тому времени уже давно мечтали не просто научиться манипулировать квантовым состоянием внутри отдельного атома, но и передавать эту

квантовую информацию от одного атома к другому — это один из первых шагов на пути к созданию квантового компьютера. Работа группы Вайнленда 1995 года (которая, кстати, называлась «Демонстрация фундаментального квантового логического вентиля») показала, как это можно сделать. Квантовую суперпозицию, которая до сих пор «жила» внутри иона, теперь можно было превратить в нечто «внешнее», в суперпозицию поступательного движения. А это значит, что если неподалеку находится второй такой ион, который неизбежно связан с первым за счет электростатического взаимодействия, то он сможет воспринять ее и превратить ее в свою внутреннюю суперпозицию без потери когерентности (что и было достигнуто в 2003 году). Линейная цепочка таких атомов, зависшая в поле периодической ловушки, тогда сможет выполнять все функции квантового компьютера.

После этого достижения экспериментальные методы в физике квантовой информации (а точнее, в ее ионной реализации) начали развиваться лавинообразно. В 1998 году Вайнленд добился квантового запутывания двух пространственно разнесенных ионов — опять же через суперпозицию поступательного движения. В 2000-х годах несколько исследовательских групп добились контролируемого квантового запутывания уже нескольких ионов. На сегодня уже реализовано квантовое запутывание 14 ионов, а также многие из логических операций, необходимых для работы квантового вычислителя (см. обзорную статью Блатта и Вайнленда [50] за 2008 год).

Сверхточные часы

Еще на заре развития описанных выше методов было ясно, что пленение и квантовый контроль отдельных ионов может иметь и далеко идущие практические применения. С одной стороны, глубоко охлажденные одиночные квантовые частицы могут стать сверхчувствительным сенсором внешних возмущений. С другой стороны, использование тех атомных переходов, которые малочувствительны к внешним возмущениям, позволит создать новый сверхстабильный стандарт частоты. Группа Вайнленда сейчас работает, среди прочего, и над этой задачей, используя всё те же плененные ионы. Два года назад, например, они сообщили о создании оптических часов, темп хода которых был измерен с относительной точностью 10^{-17} . Сейчас в литературе уже обсуждается точность хода на уровне 10^{-18} и лучше.

Практическая польза от сверхточного стандарта частоты в том, что он позволяет замечать и использовать для практических целей исключительно слабые физические эффекты. Ярким примером тут является еще одна статья группы Вайнленда двухлетней давности, благодаря которой эффект общей теории относительности может найти применение в геодезии и гидрологии благодаря использованию сверхточных атомных часов. Дело тут в том, что, согласно общей теории относительности, время течет по-разному в гравитационном поле разной напряженности. При удалении от поверхности Земли гравитационное поле начинает ослабевать, и поэтому скорость хода часов, расположенных на разной высоте, будет отличаться. Группа Вайнленда сообщает, что ей удалось заметить это расхождение при разнице

высот меньше 1 метра!

Такая тесная связь между разными разделами физики и их неожиданный выход на практические приложения — характерная черта современной науки. И если уж говорить о практической пользе фундаментальной физики, то работы нынешних нобелевских лауреатов лишний раз подтверждают справедливость тезиса: с помощью фундаментальной науки мы находим и используем на практике новые природные явления, до которых мы бы просто не смогли догадаться сами, застряв в рамках «инновационных» или «рационализаторских» предложений, основанных на старой физике.

3.5. Квазикристаллы. Нобелевская премия по химии 2011 года.

Присуждение Нобелевской премии по химии физикам и за «чисто физические» исследования не редкость. Достаточно вспомнить М.Склодовскую-Кюри, ее дочь И.Кюри и зятя Ф.Жолио . Великий физик Э.Резерфорд шутил, что ему известно только одно мгновенное химическое превращение, когда он превратился из физика в химика при присуждении ему Нобелевской премии. Так случилось и в 2011 году при присуждении Нобелевской премии

Израильский химик Даниэль Шехтман (Daniel Shechtman) родился в Тель-Авиве в 1941 году. В 1966 году в Технионе он получил степень бакалавра, в 1968 году — магистра, а в 1972 году — доктора философии. После получения степени доктора философии Шехтман в лаборатории AFRL при авиабазе Райта-Паттерсона в штате Огайо, США, три года изучал свойства алюминидов титана. В 1975 году он устроился на факультет материаловедения в Технионе. В 1981—1983 годы Шехтман находился в творческом отпуске в Университете Джонса Хопкинса, где он совместно с институтом НИСТ занимался изучением быстроохлаждённых сплавов алюминия с переходными металлами. Результатом этих исследований стало открытие икосаэдрической фазы и последующее открытие квазипериодических кристаллов. В 1992—1994 годы Шехтман находился в творческом отпуске в НИСТе, где занимался изучением влияния дефектных структур кристаллов, выращенных методом химического осаждения из газовой фазы, на их рост и свойства. В 1996 году Шехтман был избран членом Израильской Академии Наук, в 2000 году — членом Национальной Технической Академии США, в 2004 году — членом Европейской Академии Наук. В 2011 Даниэль Шехтман был награжден Нобелевской премией по химии за "открытие квазикристаллов" [45,48].

Лауреата Нобелевской премии по химии в 2011 году Даниэля Шехтмана можно смело поставить в один ряд с Эйнштейном и Планком. Его открытия перевернули мир. Что же он открыл? Квазикристаллы. Появление в научной среде квазикристаллов вызвало не меньший резонанс, чем появление специальной теории относительности и квантовой теории.

Даниэль Шехтман родился в Тель-Авиве. Все его научные достижения связаны с Технионом (Израильский Технологический институт). Его альма-матер. Даже, несмотря на то, что главное открытие его жизни было сделано

за пределами Израиля.

После получения учёной степени Шехтман отправился покорять Америку. И ему это почти удалось. Ведь он работал в таких местах, как Университет Джона Хопкинса, Национальный институт стандартов, Исследовательская лаборатория ВВС США. Именно в Исследовательской лаборатории ВВС Даниэль Шехтман открыл существование квазикристаллов. Но его открытие меняло представление о кристаллах, поэтому ему пришлось выслушивать насмешки. А кроме насмешек Даниэля Шехтмана попросили покинуть лабораторию. Ему ничего не оставалось, как вернуться в Израиль, что он и сделал.

Вернувшись в свою альма-матер, Шехтман опубликовал полученные результаты. И это открытие перевернуло мир. Открытие было сделано в 1982 году, но премия нашла своего обладателя лишь в 2011. Конечно, с тех пор утекло много воды. Да и квазикристаллы стали использоваться в промышленности. Может быть, именно поэтому премия нашла своего героя только сейчас.

После открытия квазикристаллов Шехтман решил заняться осаждением кристаллов из газовой фазы, для этого он снова вернулся в США, где устроился в лабораторию при Национальном институте стандартов. В 2004 году Шехтман решил перебраться в Лабораторию Эймса в Университете Айовы, где он и проводит свои исследования в настоящий момент. Основной областью научных изысканий Шехтмана является материаловедение, поэтому не удивительно, что его хобби является изготовление ювелирных изделий. Одним из его последних клиентов был король Швеции Карл XVI Густав.

Как известно, все природные вещества представлены кристаллами с геометрически упорядоченной пространственной структурой. При этом, осей симметрии 5-го, 7-го и более высокого порядка не существует. Это написано в любом учебнике по физике твердого тела – см. например, Л.Д.Ландау и Е.М. Лифшиц том V параграф 130, в котором доказывается соответствующая теорема. Шехтман, исследуя квазикристаллы на основе быстро охлажденных сплавов $AlMn$, обнаружил для них оси симметрии 7-го, 8-го, 10-го, 12-го порядков. Такие вещества обладают также высокой твёрдостью, что позволяет их использовать в производстве сверхпрочных сталей, а также у квазикристаллов отсутствует липкость, что позволяет использовать иглы с квазикристаллическим покрытием для проведения операций на глазах. Вот так открытие Шехтмана изменило мир. Теперь операции на глазах стали более безопасными, а также удалось получить сверхпрочные сплавы, которые имеют высокую прочность из-за неупорядоченной структуры, т.е. в математическом понятии структура упорядочена, но геометрическая симметрия отсутствует.

Даниэль Шехтман открыл квазикристаллы при наблюдении в микроскопе за структурой алюминиево-марганцевых сплавов, полученных сверхбыстрым охлаждением, скорость охлаждения составляла около 10^6 К/с. Это очень быстро, поэтому и удалось получить несимметричную структуру.

Квазикристаллы имеют довольно высокую стоимость, даже несмотря на то, что цена на металлический алюминий довольно невысокая, да и не из любых веществ их можно получить. Для получения квазикристаллов требуется перитектика, но не все металлические системы обладают таким свойством. Такое свойство имеется лишь у некоторых соединений веществ. Квазикристаллы довольно сложно получить, потому что состав твёрдой и жидкой фазы значительно отличается. Казалось бы, благодаря этому квазикристаллов не может существовать в природе, но это не так, квазикристаллы были обнаружены в 2009 году в Корякском нагорье в России, и они состояли из трёх элементов – меди, железа и алюминия.

Глава 4. Лазеры и их применение

В пятидесятых годах XX в. зародилась и начала интенсивно развиваться область физики, получившая название квантовой электроники. Основной ее задачей является получение и усиление излучения с помощью квантовых систем – квантовых усилителей и генераторов.

В основе таких квантовых систем лежит открытое теоретически в 1917г. А. Эйнштейном явление индуцированного излучения. В течение последующих 35 лет физиками не раз обсуждался вопрос о возможности его практического использования. Однако первые реальные предложения о практическом использовании эффекта индуцированного излучения были сделаны только в пятидесятых годах советскими учеными Н.Г.Басовым и А.М.Прохоровым и, независимо, американскими исследователями Ч.Таунсом и Дж.Вебером, которым удалось построить квантовые усилители – мазеры (от английского Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Несколькими годами позже А.М.Прохоровым и, независимо, А.Шавловым была разработана теория открытых резонаторов и область квантовой электроники расширилась на инфракрасную и оптическую часть спектра – появились оптические квантовые генераторы – лазеры (от английского Light...). С данного момента работа в этой области развернулась в исключительно широком масштабе и приняла разнообразный характер. Первоначально исследования, в основном, были направлены на изучение физической сущности явления. Однако вскоре они приобрели и техническую

направленность – применение квантовых систем для целей локации, связи, телевидения, навигации, обработки информации и т.д.

Большое значение данных работ для развития науки и техники отмечено присуждением Нобелевских премий по физике Н.Г.Басову, А.М.Прохорову и Ч.Таунсу в 1964 г., А.Шавлову в 1981 г.

Николай Геннадиевич Басов (14.12.1922 – 01.07.2001) родился в деревне (ныне городе) Усмань, вблизи Воронежа, в семье Геннадия Федоровича Басова и Зинаиды Андреевны Молчановой. Его отец, профессор Воронежского лесного института, специализировался на влиянии лесопосадок на подземные воды и поверхностный дренаж. Окончив школу в 1941 году, молодой Басов пошел служить в Советскую Армию. Во время Великой Отечественной войны он прошел подготовку на ассистента врача в Куйбышевской военно-медицинской академии и был прикомандирован к Украинскому фронту.

После демобилизации в декабре 1945 года Басов изучал теоретическую и экспериментальную физику в Московском инженерно-физическом институте. В 1948 году, за два года до окончания института, он стал работать лаборантом в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР в Москве. Получив диплом, он продолжал обучение под руководством М.А. Леонтовича и А.М. Прохорова, защитив кандидатскую диссертацию в 1953 году. Три года спустя он стал доктором физико-математических наук, защитив диссертацию, посвященную теоретическим и экспериментальным исследованиям молекулярного генератора, в котором в качестве активной среды использовался аммиак.

Основной принцип, лежащий в основе молекулярного генератора (ныне известного как мазер, по начальным буквам английского выражения), был впервые разъяснен Альбертом Эйнштейном в 1917 году. Исследуя взаимодействие между электромагнитным излучением и группой молекул в замкнутом пространстве, Эйнштейн вывел уравнение с тремя членами, которые описывали поглощение и испускание излучения молекулами. Энергия атомов и молекул, связанная с конфигурацией и движением их электронов, ограничена некоторыми дискретными значениями, или энергетическими уровнями. Множество энергетических уровней индивидуально для конкретного атома или молекулы. Фотоны, чья энергия равна разности двух энергетических уровней, могут поглощаться, и тогда атом или молекула переходят с более низкого на более высокий энергетический уровень. Некоторое время спустя они спонтанно вновь возвращаются на более низкий уровень (не обязательно на тот, с которого стартовали) и выделяют энергию, равную разности между прежним и новым уровнями, в виде фотона излучения.

Первые два члена в уравнении Эйнштейна связаны с уже известными процессами поглощения и спонтанного излучения. Третий член, открытый

Эйнштейном, был связан с переходом с более высокого на более низкий энергетический уровень, вызванный наличием излучения подходящей частоты, чьи фотоны обладали энергией, равной разности между этими двумя уровнями. Поскольку данное излучение происходит не спонтанно, а провоцируется специальными обстоятельствами, оно было названо стимулированным (индуцированным) излучением. Хотя это было интересное явление, его польза была вовсе не очевидной. Физический закон, сформулированный австрийским физиком Людвигом Больцманом, показывал, что в состоянии равновесия более высокие энергетические уровни заняты меньшим числом электронов, чем более низкие. Поэтому в индуцированном излучении принимает участие относительно мало атомов.

Басов придумал способ, как использовать индуцированное излучение, чтобы усилить поступающее излучение и создать молекулярный генератор. Чтобы добиться этого, ему пришлось получить состояние вещества с инверсной заселенностью энергетических уровней, увеличив число возбужденных молекул относительно числа молекул, находящихся в основном состоянии. Этого удалось добиться с помощью выделения возбужденных молекул, используя для этой цели неоднородные электрические и магнитные поля. Если после этого облучить вещество излучением нужной частоты, чьи фотоны обладают энергией, равной разности между возбужденным и основным состояниями молекул, то возникает индуцированное излучение той же частоты, усиливающее подающий сигнал. Затем ему удалось создать генератор, направляя часть излучаемой энергии на то, чтобы возбудить больше молекул и получить еще большую активизацию излучения. Полученный прибор был не только усилителем, но и генератором излучения с частотой, точно определяемой энергетическими уровнями молекулы.

На Всесоюзной конференции по радиоспектроскопии в мае 1952 года Басов и Прохоров предложили конструкцию молекулярного генератора, основанного на инверсной заселенности, идею которого они, однако, не публиковали до октября 1954 года. В следующем году Басов и Прохоров опубликовали заметку о «трехуровневом методе». Согласно этой схеме, если атомы перевести из основного состояния на наиболее высокий из трех энергетических уровней, на промежуточном уровне окажется большее число молекул, чем на нижнем, и можно получить индуцированное излучение с частотой, соответствующей разности энергий между двумя более низкими уровнями.

Американский физик Чарлз Х. Таунс, работая независимо в том же направлении в Колумбийском университете, создал работающий мазер (он с коллегами и придумал этот термин) в 1953 году, как раз за десять месяцев до того, как Басов и Прохоров опубликовали свою первую работу по молекулярным генераторам. Таунс использовал резонансную полость,

заполненную возбужденными молекулами аммиака и достиг невероятного усиления микроволн с частотой в 24000 мегагерц. В 1960 году американский физик Теодор Мейман, работая в компании «Хьюз эйркрафт», построил прибор, основанный на трехуровневом принципе, для усиления и генерирования красного света. Резонансная полость Меймана представляла собой длинный кристалл синтетического рубина с зеркальными концами; возбуждающее излучение получалось при вспышках окружающей рубин спиральной трубки, заполненной ксеноном (аналогичной неоновой трубке). Прибор Меймана стал известен как лазер – название, образованное от начальных букв английского выражения, означающего световое усиление с помощью индуцированного излучения.

«За фундаментальную работу в области квантовой электроники, которая привела к созданию генераторов и усилителей, основанных на лазерно-мазерном принципе», Басов разделил в 1964 году Нобелевскую премию по физике с Прохоровым и Таунсом. Два советских физика уже получили к тому времени за свою работу Ленинскую премию в 1959 году.

Басов написал один и в соавторстве несколько сотен статей по мазерам и лазерам. Его работы по лазерам восходят к 1957 году, когда он с коллегами начал их разработку и конструирование. Они последовательно разработали множество типов лазеров, основанных на кристаллах, полупроводниках, газах, различных комбинациях химических элементов, а также лазеров многоканальных и мощных короткоимпульсных. Басов, кроме того, первым продемонстрировал действие лазера в ультрафиолетовой области электромагнитного спектра. В дополнение к своим фундаментальным исследованиям по инверсной заселенности в полупроводниках и по переходным процессам в различных молекулярных системах он уделял существенное внимание практическим приложениям лазера, особенно возможности его использования в термоядерном синтезе.

С 1958 по 1972 год Басов был заместителем директора в институте им. П.Н. Лебедева, а с 1973 по 1989 год – его директором. В этом же институте он возглавляет лабораторию радиофизики с момента ее создания в 1963 году. С этого года он также профессор Московского инженерно-физического института.

В 1950 году Басов женился на Ксении Тихоновне Назаровой, физике из МИФИ. У них два сына.

Кроме Нобелевской премии, Басов получил звание дважды Героя Социалистического Труда (1969, 1982), награжден золотой медалью Чехословацкой академии наук (1975). Он был избран членом-корреспондентом АН СССР (1962), действительным членом (1966) и членом Президиума АН (1967). Он состоял членом многих других академий наук, включая академии Польши, Чехословакии, Болгарии и Франции; а

также Германской академии естествоиспытателей «Леопольдина», Шведской королевской академии инженерных наук и Американского оптического общества. Басов являлся вице-председателем исполнительного совета Всемирной федерации научных работников и президентом Всесоюзного общества «Знание», главным редактором научно-популярных журналов «Природа» и «Квант». Он был также членом Советского комитета защиты мира и Всемирного Совета Мира. Избирался в Верховный Совет СССР в 1974 году был ном его Президиума в 1982 году [34,45,48].

Александр Михайлович Прохоров (11.07.1916 - 08.01.2002), сын Михаила Ивановича Прохорова и Марии Ивановны (в девичестве Михайловой) Прохоровой, родился в Атертоне (Австралия), куда его семья переехала в 1911 году после побега родителей Прохорова из сибирской ссылки. После Октябрьской революции семья Прохоровых в 1923 году возвратилась в Советский Союз. Окончив с отличием физический факультет Ленинградского государственного университета (1939), Прохоров поступает в аспирантуру в Лабораторию колебаний Физического института АН СССР имени П.Н. Лебедева в Москве. Здесь он изучает распространение радиоволн над земной поверхностью и вместе с одним из своих руководителей, физиком В.В. Мигулиным, разрабатывает новый метод использования интерференции радиоволн для исследования ионосферы.

Призванный в Красную Армию в июне 1941 года, Прохоров после двух ранений возвращается в 1944 году в Институт имени П.Н. Лебедева, где занимается исследованием частотной стабилизации в ламповых генераторах. Кандидатская диссертация, которую Прохоров защищает в 1946 году, посвящена теории нелинейных колебаний. За эту работу ему и двум другим физикам присуждена премия имени академика Леонида Мандельштама, выдающегося советского радиофизика. В 1947 году Прохоров приступает к исследованию излучения, испускаемого электронами в синхротроне (устройстве, в котором заряженные частицы, например протоны или электроны, движутся по расширяющимся циклическим орбитам, ускоряясь до высоких энергий), и показывает экспериментально, что излучение электронов сосредоточено в микроволновой области, где длины волн порядка сантиметров. Эта работа легла в основу диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, которую Прохоров защищает в 1951 году, и породила множество более поздних работ, выполненных другими исследователями.

После назначения заместителем директора Лаборатории колебаний в 1950 году научные интересы Прохоров перемещаются в область радиоспектроскопии. Он организует группу молодых исследователей, которые, используя радар и радиотехнику, разработанную главным

образом в Соединенных Штатах и Англии во время и после второй мировой войны, исследуют вращательные и колебательные спектры молекул. Прохоров сосредоточивает свои исследования на одном классе молекул, называемых асимметричными волчками, которые обладают тремя различными моментами инерции (анализировать структуру таких молекул по вращательным спектрам особенно трудно). Помимо чисто спектроскопических исследований, Прохоров проводит теоретический анализ применения микроволновых спектров поглощения для усовершенствования эталонов частоты и времени. Полученные выводы привели Прохорова к сотрудничеству с Николаем Басовым в разработке молекулярных генераторов, называемых ныне мазерами (аббревиатура из первых букв английских слов: микроволновое усиление с помощью индуцированного стимулированного излучения – *microwave amplification by stimulated emission of radiation*). За десять месяцев до того, как Прохоров и Басов в 1954 году опубликовали свою статью, Чарлз Х. Таунс, американский физик из Колумбийского университета, который независимо пришел к аналогичным выводам, построил действующий мазер, подтвердивший предсказания Прохорова и Басова.

Будучи директором лаборатории колебаний в институте имени П.Н. Лебедева (с 1954 года), Прохоров создает две новые лаборатории – радиоастрономии и квантовой радиофизики. Он консультирует многочисленные научно-исследовательские институты по проблемам квантовой электроники и организует лабораторию радиоспектроскопии в Научно-исследовательском институте ядерных исследований при Московском государственном университете, профессором которого Прохоров становится в 1957 году.

С середины 50-х годов Прохоров сосредоточивает усилия на разработке мазеров и лазеров и на поиске кристаллов с подходящими спектральными и релаксационными свойствами. Проведенные им подробные исследования рубина, одного из лучших кристаллов для лазеров, привели к широкому распространению рубиновых резонаторов для микроволновых и оптических длин волн. Чтобы преодолеть некоторые трудности, возникшие в связи с созданием молекулярных генераторов, работающих в субмиллиметровом диапазоне, Прохоров предлагает новый открытый резонатор, состоящий из двух зеркал. Этот тип резонатора оказался особенно эффективным при создании лазеров в 60-е годы.

Нобелевская премия по физике 1964 года была разделена: одна половина ее присуждена Прохорову и Басову, другая – Таунсу «за фундаментальные работы в области квантовой электроники, приведшие к созданию генераторов и усилителей на основе принципа мазера – лазера».

Находясь на посту заместителя директора Физического института АН СССР имени П.Н. Лебедева с 1973 года, Прохоров продолжает расширять

исследование по физике лазеров, в том числе по их применению для изучения многоквантовых процессов и термоядерного синтеза. В начале 80-х годов Прохоров организует новый институт по данной тематике - Институт общей физики АН СССР и становится его директором (с 1982 года).

С 1941 года Прохоров женат на Галине Алексеевне Шелепиной, географе по специальности. У них один сын.

В 1960 году Прохоров избирают членом-корреспондентом, в 1966 году – действительным членом и в 1970 году – членом президиума АН СССР. Он почетный член Американской академии наук и искусств. В 1969 году он был назначен главным редактором Большой Советской Энциклопедии. Прохоров почетный профессор университетов Дели (1967) и Бухареста (1971). Советское правительство присвоило ему звание Героя Социалистического Труда (1969) [34,45,48].

*Американский физик **Чарльз Хард Таунс** родился 28 июля 1915 года в Гринвилле (штат Южная Каролина); он был четвертым из шести детей Генри Кейта Таунса, адвоката, и Эллен Самтер (в девичестве Хард) Таунс. Выросший на ферме в двадцать акров в окрестностях Гринвилля, мальчик стал рано проявлять интерес к природе. Обнаружив блестящие способности в школе и перескочив через седьмой класс, он поступил в Фурманский университет в Гринвилле в 16-летнем возрасте. Окончив его в 1935 году с двойным отличием, он стал бакалавром наук в области физики и бакалавром искусств в области современных языков. Хотя он выбрал физику своим основным занятием, привлеченный ее логикой и изяществом ее структуры, он в жизни прекрасно читал на французском, немецком, испанском, итальянском и русском языках. После годичной аспирантуры в Дьюкском университете Таунс получил степень магистра по физике в 1936 году, а затем и докторскую степень в 1939 году в Калифорнийском технологическом институте. Его докторская диссертация называлась «Разделение изотопов и определение спина ядра углерода-13» («The Separation of Isotopes and the Determination of the Spin of the Nucleus of Carbon 13»).*

Первая работа Таунса проходила в лабораториях компании «Белл», где он оставался с 1939 по 1947 год, занимаясь главным образом и весьма успешно задачами военно-прикладного характера, как, например, разработкой авиационного радара для прицельного бомбометания. Примечательно, что его успех однажды состоял в предсказании неудачи. Во время войны в радарах использовалась длина волны в 3 см (соответствует частоте 10 гигагерц). После войны руководство военно-воздушных сил попросило компанию «Белл» разработать радар, который работал бы на длине волны в 1,25 см (24 гигагерц). Более высокочастотный радар должен был не только обеспечить более высокую точность, но и должен был иметь меньший вес и занимать меньше места

в самолете. Таунс предсказал, что новая система окажется неэффективной, поскольку водяные пары в атмосфере поглощают излучение именно этой частоты. Не убежденные в этом, ВВС построили радар, и их постигла неудача. Однако этот случай пробудил у Таунса интерес к взаимодействию высокочастотных радиоволн (микроволн) с молекулами.

В 1948 году Таунс был назначен адъюнкт-профессором физики в Колумбийском университете. Он стал исполнительным директором университетской радиационной лаборатории в 1950 году, возглавлял физический факультет с 1952 по 1955 год и оставался в университете полным профессором до 1961 года. В течение этого периода он также учился музыке и вокалу в вечерних классах музыкальной школы Жуйяра. Выполняя научные исследования в Колумбийском университете, Таунс понял, что поглощение микроволн может служить основой для новой техники – микроволновой спектроскопии, позволяющей определять строение молекул.

Во время работы Таунс в компании «Белл» радарные волны генерировались электронами, осциллирующими внутри металлических резонаторов, размеры которых определялись с высокой точностью. Эти размеры определяли длину волны, и самая короткая достижимая длина волны была около 1 мм (300 гигагерц). Таунс задумал в противоположность этому использовать естественные свойства молекул, чтобы преодолеть эти ограничения.

Николай Басов и Александр Прохоров (СССР) пришли независимо к аналогичным выводам. Таунс вместе с аспирантами Колумбийского университета построил работающий прибор в декабре 1953 года и назвал его «мазер» – сокращение от английского выражения *microwave amplification by stimulated emission of radiation*: микроволновое усиление с помощью индуцированного (стимулированного) излучения. В первом лазере молекулы аммиака проходили через электрические поля специальной конфигурации, которые отталкивали молекулы, находящиеся в основном состоянии, и фокусировали возбужденные молекулы в резонансной полости. Когда в полости накапливалась достаточная концентрация возбужденных молекул, становилась возможной осцилляция. Небольшая порция излучения нужной частоты (с энергией фотона, равной разности между основным и возбужденным состояниями у молекулы аммиака) может вызвать лавинообразный рост индуцированного излучения, возбуждение еще большего числа молекул, находившихся в основном состоянии, и еще большее возрастание этого излучения. В результате получается мощный усилитель излучения. Разность энергий в основном и возбужденном состояниях у молекулы аммиака определяет энергию выделяющихся фотонов и, следовательно, частоту, которая в данном случае лежит в микроволновом диапазоне.

Вскоре выяснилось, что мазеры обладают столь стабильной частотой, что могут служить высокоточными часами. С помощью двух мазеров Таунс и его коллеги проверили и подтвердили специальную теорию относительности Эйнштейна, причем эту проверку позже назвали наиболее точным физическим экспериментом в истории.

Во время своего творческого отпуска в Париже в 1956 году Таунс вместе с коллегами показал в Парижском университете, что действие лазера можно осуществить с помощью трех уровней в некоторых твердых кристаллах, содержащих примеси. Излучение подходящей частоты может возбудить атомы примесей до самого высокого из трех уровней. Затем эти атомы, потеряв часть своей энергии, оказываются «пойманными» относительно стабильным промежуточным энергетическим состоянием. Затем к действию лазера и выделению излишней энергии в виде излучения добавляется скачок из промежуточного в основное состояние, сопровождающийся усилением входного излучения той же частоты. В такой системе к физическому носителю лазера следует прикладывать энергию большей частоты (с более короткой длиной волны), чем усиливаемая, поскольку атомы нужно возбудить до более высокого, третьего, уровня. Вскоре лазер стал выполнять роль высокочувствительного усилителя с низким уровнем шума для приема микроволн во многих различных системах. Так, например, в радиоастрономии он позволил распознавать радиоисточники на огромных расстояниях от Земли.

*В 1958 году Таунс и его шурин Артур Л. Шавлов сформулировали требования, которые необходимо выполнить, чтобы построить лазер, действующий в более высокочастотной области, соответствующей инфракрасному, видимому и ультрафиолетовому свету. Два года спустя американский физик Теодор Мейман построил такой прибор, излучавший красный свет, в котором в качестве резонансной полости использовался стержень из искусственного рубина с зеркальными концами, а возбуждаемыми атомами служили атомы хрома, вкрапленные в рубин. Этот прибор назвали лазером от английского выражения *light amplification by stimulated emission of radiation* – световое усиление с помощью индуцированного (стимулированного) излучения. Дальнейшее развитие лазеров носило лавинообразный характер, приведя к образованию новой области, получившей название квантовой электроники. Ныне лазеры используются в связи, машиностроении, медицине, инструментальных и измерительных приборах, в искусстве и в военных областях.*

Таунс разделил в 1964 году Нобелевскую премию по физике с Николаем Басовым и Александром Прохоровым «за фундаментальную работу в области квантовой электроники, которая привела к созданию осцилляторов и усилителей, основанных на мазерно-лазерном принципе».

С 1959 по 1961 год Таунс был вице-президентом и директором по науке Института оборонных исследований, занимающегося вопросами обороны, стратегии и системами вооружений. В 1961 году он занял пост проректора и профессора физики Массачусетского технологического института, а в 1966 году был назначен университетским профессором физики в Калифорнийском университете в Беркли.

Во время службы в Институте оборонных исследований Таунс продолжал активно участвовать в вопросах разработки научной политики, в работе многочисленных местных и правительственных комитетов. В Калифорнийском университете Таунс и его коллеги в области инфракрасной и микроволновой астрономии открыли первые многоатомные молекулы в межзвездном пространстве, а именно молекулы аммиака и воды. Он также ввел новые современные методы инфракрасного детектирования, использующие лазерные осцилляторы, в астрономическую спектроскопию и интерферометрию. Эта работа привела к созданию в 1987 году системы передвижных инфракрасных телескопов, которая, по словам Таунса, позволит различить в 100 раз больше деталей, чем обычный радиотелескоп.

Таунс был членом правления Солковского института биологических исследований с 1963 по 1968 год и компании «Рэнд корпорейшн» в 1965-70 годах. Он являлся членом научно-консультативной группы ВВС США с 1958 по 1961 год и возглавлял Научно-технологический консультативный комитет по полетам человека в космос при НАСА с 1964 по 1969 год. В 1969 году он член Президентской группы по национальной научной политике, в 1971-73 годах – научный советник компании «Дженерал моторе».

В 1941 году Таунс женился на Фрэнсис Браун. У них четыре дочери. Любитель-натуралист, Таунс увлекается музыкой, языками, подводным плаванием и путешествиями.

Кроме Нобелевской премии, Таунс получил премию Комстока Американской Национальной академии наук (1959); медаль Стюарта Баллантайна Франклиновского института (1959, 1962); премию по электронике Дэвида Сарноффа Американского электротехнического института (1961); медаль Джона Карти Американской Национальной академии наук (1962); почетную медаль за общественную деятельность, присуждаемую НАСА (1969); международную золотую медаль Нильса Бора Датского общества инженеров – строителей, электриков и механиков (1979) и Национальную медаль «За научные достижения» Национального научного фонда (1982). Он член американской Национальной академии наук, Института инженеров по электротехнике и электронике, Американской академии наук и искусств, Американского философского общества и Американского астрономического общества. Является иностранным членом Лондонского

королевского общества. Он получил почетные ученые степени от более чем двадцати колледжей и университетов и является членом редколлегии журналов «Ревью оф сайентифик инструменте» («Review of Scientific Instruments»), «Физикал ревью» («Physical Review»), «Джорнэл оф молекуляр спектроскопи» («Journal of Molecular Spectroscopy»)[34,45,48].

Американский физик **Артур Леонард Шавлов** родился 5 мая 1921 года в г. Маунт-Верноне (штат Нью-Йорк). За десять лет до этого события его отец, Артур Шавлов, иммигрировал в Соединенные Штаты из Риги (Латвия). Поселившись в Нью-Йорке, он стал работать агентом по страхованию и женился на канадской подданной Элен Мейсон. Когда Артуру исполнилось три года, семья (вместе с родившейся дочерью) переселилась в Канаду.

Выросший в Торонто, Шавлов посещал Винчестерскую начальную школу. Нормальную образцовую школу при учительском колледже и Воган-Роуд-колледж среднее учебное заведение, которое окончил в 1937 году. Он надеялся продолжить свое образование и в соответствии с проявившимся еще в детские годы интересом к естественным наукам избрал специальность радиоинженера в Университете Торонто, но из-за трудностей, вызванных депрессией, родители не смогли оказать ему должной материальной поддержки. Мечте о профессии радиоинженера не суждено было сбыться, но Шавлов завоевал почетную стипендию по математике и физике. По его собственным воспоминаниям, «физика казалась мне весьма близкой к радиоделу, поэтому я решил заняться изучением физики».

К тому времени, когда Шавлов получил степень бакалавра (1941), Канада вступила в войну, и он преподавал на курсах для военного персонала при Университете Торонто до 1944 года, после чего принял участие в работе над проектом создания микроволновой антенны на заводе, занимавшемся изготовлением радарного оборудования. В 1945 году он возвращается в Университет Торонто, где выполняет диссертационную работу по оптической спектроскопии под руководством Малкольма Ф. Кроуфорда, о котором он отзывался впоследствии как о «необычайно творческой личности». Степень доктора по физике Шавлов получает в 1949 году.

Стипендия для постдокторантов компании «Карбайд энд карбон кемиклс» позволяет ему провести два года в Колумбийском университете, работая с Чарлзом Х. Таунсом над проблемами микроволновой спектроскопии.

В 1951 году Шавлов становится сотрудником лаборатории компании «Белл» в Мюррей-Хилле (штат Нью-Джерси). Основной областью его исследований становится сверхпроводимость явление, открытое в 1911 году голландским физиком Хейке Камерлинг-Оннесом и состоящее в полном исчезновении электрического сопротивления в некоторых

веществах при охлаждении их до температур, близких к абсолютному нулю. Шавлов не порывал связи с Таунсом. Они встречались в конце недели и работали над завершением книги «Микроволновая спектроскопия» ("Microwave Spectroscopy"), начатой еще в бытность Шавлов в Колумбийском университете. Книга была опубликована в 1955 году.

За два года до этого Таунсу и двум его коллегам удалось разработать устройство, которое они называли мазером по первым буквам английских слов. В 1957-58 годах Таунс и Шавлов занимались поисками способа получения мазерного эффекта на видимом свете и в декабре 1958 года опубликовали в журнале «Физикал ревью» ("Physical Review") статью «Инфракрасные и оптические мазеры» ("Infrared and Optical Masers"), в которой объяснили, как это можно сделать.

В 1960 году Шавлов возвращается в Колумбийский университет, на этот раз в качестве приглашенного профессора. На следующий год он становится профессором физики в Станфордском университете, где и остается, проработав в течение пяти лет деканом физического факультета. Он продолжает совершенствовать лазерную технологию, стремясь добиться выхода полностью монохроматического (одночастотного) излучения с регулируемой частотой (лазеры с перестраиваемой частотой). Однако в большинстве своих работ Шавлов использует лазеры для исследования атомов и молекул, с начала 60-х годов он становится одной из ведущих фигур в быстро развивающейся области лазерной спектроскопии.

В основе лазерной спектроскопии лежит тот фундаментальный факт, что атомы и молекулы поглощают и испускают электромагнитное излучение на характеристических частотах (энергиях фотонов), соответствующих разностям энергий между их различными энергетическими уровнями. Спектр частот излучения, испускаемых после возбуждения и перехода в более высокие энергетические состояния или предпочтительно поглощаемых из падающего излучения, помогает идентифицировать элементы, устанавливать структуру атомов и молекул и проверять выводы фундаментальной теории вещества и излучения. Создание лазера с перестраиваемой частотой явилось важным достижением, поскольку излучение такого лазера практически монохроматично (что позволяет точно измерять частоту), обладает высокой интенсивностью (что позволяет снимать спектры при относительно малом числе атомов или молекул) и облегчает настройку лазера на желательную частоту.

Работая вместе с Теодором В. Хеншем (ставшим Нобелевским лауреатом в 2006 году) в Станфорде, Шавлов разрабатывает несколько способов, позволяющих преодолеть трудности, связанные с доплеровским уширением, путем выделения спектров поглощения, испущенных атомами,

скорость которых не содержит компоненты, параллельной лазерному пучку. Поскольку такие атомы не приближаются к источнику излучения и не удаляются от него, эффект Доплера полностью исключается. В 1972 году Шавлов и его сотрудники получили первые оптические спектры атомарного водорода, на которых не сказывался эффект Доплера, что позволило измерить с недостижимой ранее точностью постоянную Ридберга – одну из наиболее важных констант в физике.

Спектры молекул, вообще говоря, гораздо сложнее, чем спектры атомов, и Шавлов воспользовался лазерами для упрощения молекулярных спектров с помощью так называемых лазерных меток. Молекулы «накачиваются» в определенное энергетическое состояние с помощью лазерного излучения, настроенного на нужную частоту (энергию фотона), после чего экспериментатор наблюдает за возвращением их на более низкие энергетические уровни. Поскольку это верхнее состояние выделено из всех возможных соседних состояний, оно называется меченым. Шавлов разработал также метод лазерной спектроскопии, позволяющий определять следы элементов в окружающем материале.

В 1981 году Шавлов вместе с Николасом Бломбергеном был удостоен половины Нобелевской премии «за вклад в развитие лазерной спектроскопии». Другая половина премии была присуждена Каю Сигбану за близкую по тематике работу в области электронной спектроскопии. На церемонии презентации лауреатов представитель Шведской королевской академии наук Ингвар Линдгрэн сказал: «Эти методы позволили исследовать внутреннюю структуру атомов, молекул и твердых тел гораздо подробнее, чем это было возможно прежде».

В 1951 году Шавлов женился на младшей сестре Чарлза Х. Таунса Аурелии. У супругов один сын и две дочери. Кларнетист-любитель, Шавлов любит традиционный джаз и собрал большую коллекцию записей. Он пользуется известностью как лектор, участвовал в создании учебно-образовательных фильмов и телевизионных научных программ.

Кроме Нобелевской премии, Шавлов удостоен медали и премии Стюарта Баллантайна Франклиновского института (1952), медали Томаса Юнга Лондонского физического института (1963), медали Фредерика Айвса Американского оптического общества (1976). Он состоит членом американской Национальной академии наук, Американской ассоциации фундаментальных наук, Американского физического общества, Американского оптического общества и Института инженеров по электротехнике и электронике. Среди почетных ученых званий Шавлова – степень почетного доктора Государственного университета в Генте, Брэдфордского университета и Университета Торонто[48].

Некоторые типы лазеров

По типу рабочего вещества лазеры подразделяются на твердотельные (в том числе, лазеры на ионных кристаллах, лазеры на стеклах, полупроводниковые лазеры и т.д.), газовые, химические и другие.

Из *твердотельных лазеров* на ионных кристаллах наиболее распространены лазеры на рубине, изобретенные Т. Мейманом в 1960 году.

Активным элементом рубинового лазера является цилиндрический кристалл рубина – окиси алюминия Al_2O_3 , в котором некоторое число атомов алюминия заменено трехвалентными ионами хрома Cr^{3+} . Ионы хрома не только определяют красный цвет рубина, но и являются генерирующими центрами (активными частицами).

Примесь ионов хрома мала и составляет доли процента от полного числа атомов среды. Так что активные частицы (ионы хрома) в рубине практически не взаимодействуют друг с другом и их энергетический спектр сохраняет некоторые черты спектра свободного изолированного иона. Однако ионы хрома находятся в кристаллической решетке, взаимодействие с которой вносит в их энергетический спектр существенные особенности отличные от спектров изолированных ионов.

Взаимодействие с полем кристаллической решетки приводит к расщеплению и уширению энергетических уровней, превращая их в энергетические полосы (зоны). Причем наибольшее уширение будут испытывать уровни, соответствующие внешним электронам атома. Электроны внутренних оболочек экранируются внешними электронами и слабо взаимодействуют с кристаллическим полем; связанные с ними энергетические уровни расширяются незначительно. Таким образом, спектр поглощения (излучения) кристалла, в решетку которого внедрены атомы элементов с незаполненными внутренними оболочками, состоит из широких полос и отдельных резких линий поглощения (излучения), ширина которых зависит от ширины соответствующих энергетических уровней.

Спектр поглощения рубина содержит две такие полосы, центральные части которых соответствуют длинам волн $\lambda_1 = 4100\text{Å}$ и $\lambda_2 = 5600\text{Å}$, а ширина каждой из них около $\sim 1000\text{Å}$. При облучении кристалла рубина, что осуществляется мощной лампой оптической накачки, ионы хрома переходят в возбужденные состояния, из которых часть ионов в течение малого времени переходит в основное состояние и часть в дублетное состояние, расположенное между нижним краем полосы поглощения и основным состоянием.

Переходы между полосой поглощения и основным состоянием - радиационные, связанные с излучением фотонов, а переходы на дублетный уровень из возбужденного состояния безызлучательные. Энергия при таком переходе передается кристаллической решетке. Вероятность безызлучательного перехода ($2 \cdot 10^7 \text{сек}^{-1}$) больше вероятности радиационного перехода ($3 \cdot 10^5 \text{сек}^{-1}$), поэтому ионы хрома будут в основном переходить на дублетный уровень. Данное состояние является метастабильным и ионы

хрома могут находиться в нем сравнительно долго ($\sim 10^{-3}$ сек). Переходом из метастабильного состояния в основное соответствуют линии излучения с длинами волн $\lambda_1 = 6943 \text{ \AA}$ и $\lambda_2 = 6929 \text{ \AA}$. Каждая из этих линий в свою очередь является дублетом (состоит из двух близко расположенных уровней, расстояние между которыми $0,38 \text{ см}^{-1}$). Однако при комнатной температуре тонкую структуру этих линий наблюдать нельзя из-за их большой ширины ($\sim 1 \text{ см}^{-1}$).

Лазерное излучение в рубиновом кристалле, в принципе, может быть получено на обеих λ_1 и λ_2 - линиях. Однако практически все ОКГ работают на линии λ_1 , так как на ней проще осуществить состояние с инверсной населенностью. Это обусловлено тем, что вероятность перехода из полосы поглощения на нижний уровень дублета больше, чем на верхний. Кроме того, время релаксации частиц между уровнями дублета довольно мало (меньше 10^{-7} сек), поэтому между ними очень быстро устанавливается термодинамическое равновесие, так что верхний метастабильный уровень оказывается практически опустошенным, а на нижнем создается инверсная заселенность и, после достижения порога, лазер генерирует мощное излучение с длиной волны $\lambda_1 = 6943 \text{ \AA}$. Генерацию на длине волны λ_2 можно осуществить, если в качестве зеркал использовать узкополосные интерференционные фильтры с максимумом пропускания на длине волны λ_2 , тем самым резко повышая добротность оптического резонатора на данной длине волны.

В твердотельных лазерах в качестве рабочего тела, кроме ионных кристаллов, используют стекла (неупорядоченные структуры), активированные редкоземельными элементами (Nd, Er и др.), а также полупроводники $ZnO, CdS, GaAs$. В полупроводниковых лазерах, в отличие от лазеров других типов, используются квантовые переходы между разрешенными энергетическими зонами, а не дискретными уровнями энергии. В полупроводниковой активной среде может достигаться очень большой показатель оптического усиления (до 10^4 см^{-1}), благодаря чему размеры активного элемента полупроводникового лазера исключительно малы (длина резонатора $50 \text{ мкм} - 1 \text{ мм}$). Помимо компактности, особенностями полупроводниковых лазеров является малая инерционность (10^{-9} сек), высокий к.п.д. (до 50%), возможность спектральной перестройки и большой выбор веществ для генерации в широком спектральном диапазоне от $\lambda=0,3 \text{ мкм}$ до 30 мкм . Активными частицами в полупроводниковых лазерах служат избыточные (неравновесные) электроны проводимости и дырки, т.е. свободные носители заряда, которые могут инжектироваться, диффундировать и дрейфовать в активной среде. Важнейшим способом накачки в полупроводниковых лазерах является инжекция через $p-n$ переход или гетеропереход, позволяющая осуществить непосредственное преобразование электрической энергии в когерентное излучение –

инжекционный лазер. Другими способами накачки служит электрический пробой – стримерный лазер, бомбардировка электронами – полупроводниковый лазер с электронной накачкой и освещение – полупроводниковый лазер с оптической накачкой. Впервые полупроводниковый лазер был построен в 1962 году в Лаборатории Линкольна (США) Б.Лэксом. Первоначально полупроводниковые лазеры создавались на основе ZnO и CdS и требовали для своей работы глубокого охлаждения, что затрудняло их использование. Полупроводниковые лазеры на арсениде галлия, работающие при комнатных температурах, осуществлены Р.Холлом и М.И.Нейтеном. Полупроводниковые лазеры с электронной накачкой разработаны Н.Г.Басовым с сотрудниками.

Оптическое усиление в полупроводниках возникает под действием интенсивной накачки при выполнении условий инверсии населенности уровней вблизи дна в зоне проводимости и потолка в валентной зоне. При этом вероятность заполнения электронами верхних рабочих уровней в разрешенной зоне (зоне проводимости) больше, чем нижних уровней (валентной зоны). В этом случае вынужденные излучательные переходы преобладают над поглощательными переходами. Величина оптического усиления зависит не только от интенсивности накачки, но и от других факторов: вероятности излучательной рекомбинации, внутреннего квантового выхода излучения, температуры. В качестве лазерных материалов используются прямозонные полупроводники (например, ZnO , CdS , PbS), в которых квантовый выход излучения может достигать 100 %. Разнообразие полупроводниковых лазерных материалов позволяет перекрыть широкий спектральный диапазон.

Инжекционный полупроводниковый лазер представляет собой полупроводниковый диод, две плоскопараллельные грани которого перпендикулярные плоскости $p-n$ перехода или гетероперехода, служат зеркалами оптического резонатора, коэффициент отражения достигает при этом 30 %. Иногда применяются внешние резонаторы. Инверсия заполнения достигается при большом прямом токе через диод за счет инжекции дополнительных носителей в слой, прилегающий к переходу. Генерация когерентного излучения возникает в полосе краевой люминесценции, если оптическое усиление способно превзойти потери энергии, связанные с выходом излучения наружу, поглощением и рассеянием внутри резонатора. Ток, соответствующий началу генерации, называется пороговым. Плотность порогового тока в инжекционных полупроводниковых лазерах обычно порядка 1 кА/см².

Наибольшее распространение получили полупроводниковые лазеры на основе гетероструктур – гетеролазеры, имеющие наиболее низкие пороговые плотности тока при температурах 300 К. Основой для их создания послужили фундаментальные исследования, проведенные в 60-х годах Жоресом Ивановичем Алферовым в Физико-техническом институте АН СССР. Им было открыто явление сверхинжекции в гетероструктурах, что позволило на принципиально по-новому управлять электронными и световыми потоками в

полупроводниковых гетероструктурах. За эти исследования Ж.И.Алферову в 1972 году была присуждена Ленинская премия, а в 2001 году Нобелевская премия по физике (совместно с Г.Кремером).

Гетеролазер содержит два гетероперехода, один типа *p-n*, инжектирующий электроны (эмиттер), и другой, типа *p-p*, ограничивающий диффузионное растекание носителей заряда из активного слоя; активная область заключена между ними. В так называемых полосковых лазерах активная область в форме узкой полоски шириной 1-20 мкм протягивается от одного зеркала к другому. Благодаря малым размерам активной области пороговый ток полосковых лазеров достаточно мал (5-150 мА) для получения непрерывной генерации при $T=300$ К. Мощность излучения таких полупроводниковых лазеров (около 100 мВт) ограничена перегревом активной области. В коротких импульсах полупроводниковые лазеры испускают большую мощность (до 100 кВт), которая ограничена оптическим разрушением торцевых граней. Многоэлементные инжекционные лазеры создают в импульсе мощность до 10 кВт.

Полупроводники, из которых могут быть изготовлены гетеролазеры, при различном химическом составе должны обладать одинаковым периодом кристаллической решетки. Используются многокомпонентные твердые растворы, среди которых можно найти непрерывные ряды веществ с постоянным периодом решетки (изопериодические системы). Например, в гетеролазере на основе твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ гетероструктуру составляют слои: $p(Al_xGa_{1-x}As)$; $p(GaAs)$; $n(Al_xGa_{1-x}As)$.

Основные типы полупроводников, используемых в гетеролазерах, приведены в таблице:

Активный слой	Широкозонные эмиттеры	Подложка	Диапазон длин волн, мкм	Рабочая темп. К
<i>GaInPAs</i>	<i>GaInP</i> ; <i>GaInPAs</i>	<i>GaAs</i>	0,575 – 0,600	77
<i>GaInPAs</i>	<i>GaInP</i> ; <i>GaInPAs</i>	<i>GaAs</i>	0,637 – 0,660	300
<i>GaPAs</i>	<i>AlGaAsP</i>	<i>GaAs</i>	0,74 – 0,80	300
<i>AlGaAs</i>	<i>AlGaAs</i> ; <i>AlGaAsP</i>	<i>GaAs</i>	0,69 – 0,90	300
<i>GaAs</i>	<i>AlGaA</i> ; <i>AlGaAsP</i> ;	<i>GaAs</i>	0,88 -0,90	300
<i>GaAsSb</i>	<i>GaInP</i>	<i>GaAs</i>	0,945 – 1,00	300
<i>GaInAs</i>	<i>AlGaAsSb</i>	<i>GaAs</i>	0,90 – 1,15	300
<i>GaInAsP</i>	<i>GaInP</i>	<i>InP</i>	1,0 - 1,67	300
<i>GaSb</i>	<i>InP</i> ; <i>GaInAsP</i>	<i>GaSb</i>	1,6 – 1,8	300
<i>AlGaAsSb</i>	<i>AlGaAsSb</i>	<i>GaSb</i>	1,3 – 1,6	300
<i>GaInAsSb</i>	<i>AlGaAsSb</i>	<i>GaSb</i>	1,8 – 2,0	77
<i>PbSSe</i>	<i>GaSb</i>	<i>PbS</i>	4,1 – 6,4	20-180
<i>PbSnTe</i>	<i>PbS</i>	<i>PbTe</i>	10 - 16	4-110
	<i>PbTe</i>			

В полупроводниковых лазерах с электронной накачкой используются пучки быстрых электронов с энергией 10^4 - 10^5 эВ (как правило, меньшей порога образования радиационных дефектов в кристалле). Избыточные

носители заряда образуются в результате замедления быстрых электронов. Глубина проникновения электронов зависит от энергии и может достигать 10^{-2} см. Полупроводниковые лазеры этого типа, помимо активного элемента, содержат источник высокого напряжения, электронную пушку и систему фокусировки и управления пучком. Достоинство полупроводниковых лазеров с электронной накачкой – возможность сканирования излучающего пятна по активному элементу, что позволяет осуществить воспроизведение и проектирование на большой экран телевизионного изображения (разновидность лазерного телевидения). Мощность излучения в импульсе в полупроводниковых лазерах этого типа может достигать 1МВт (при накачке большого объема кристалла или многоэлементной мишени). Полупроводниковые лазеры с электронной накачкой изготавливаются в виде отпаянной вакуумной трубки с оптическим окном для вывода лазерного излучения.

Из *газовых лазеров* наиболее распространение получили гелий – неоновые. Первый лазер этого типа был построен в 1961 году американским физиком Али Джаваном в лаборатории Белл-Телефон. Главной особенностью газовых лазеров, отличающей их от лазеров на твердых телах, состоит в различии методов возбуждения и подвода энергии накачки. Полосы поглощения в газах отсутствуют и при оптической накачки необходимо, чтобы линии лампы накачки точно соответствовали линиям поглощения газа в лазере. Поэтому обычные лампы использовать нельзя и используются только аргоновые, криптоновые и ртутные лампы. Кроме оптической накачки используют также возбуждение атомов электронным ударом, которое проще всего осуществить в газовом разряде, когда в газе при столкновениях возникают электроны и ионы. Обмен энергиями между ионами и атомами протекает достаточно интенсивно и, поскольку их массы практически равны, средняя кинетическая энергия ионов равна средней кинетической энергии атомов. В газовом разряде низкого давления (несколько миллиметров ртутного столба) столкновения электронов с атомами и ионами являются упругими, обмен энергии между ними в столкновениях практически не происходит и средняя кинетическая энергия электронов существенно превышает среднюю энергию атомов ($kT_e \gg kT$).

Высокие значения электронной температуры T_e являются предпосылкой того, что значительное количество электронов сможет приобретать в газовом разряде энергию, необходимую для возбуждения атомов. Если в разряде присутствует смесь двух газов, то при соударении двух различных атомов будет происходить обмен энергией возбуждения, если атомы обладают достаточно близкорасположенными энергетическими уровнями. В этом случае практически вся энергия возбуждения первого атома переходит в энергию возбуждения второго атома, и лишь малая часть ее переходит в кинетическую энергию сталкивающихся атомов. При этом ранее возбужденный атом безызлучательно переходит в основное состояние.

Особый интерес представляет случай, когда обмен энергий происходит

между атомом, находящимся в метастабильном состоянии, и невозбужденным атомом. В этом случае существует возможность передачи энергии возбуждения с сильно населенного метастабильного уровня атомов одного газа атомам другого газа, что может привести к созданию инверсной населенности. Именно такая ситуация имеет место в гелий - неоновом лазере.

В этом лазере активными частицами являются атомы неона, между уровнями которого осуществляется инверсия, а атомы гелия служат для создания эффективной накачки верхнего лазерного уровня атомов неона.

Возбужденные состояния гелия 2^3S_1 и 2^1S_0 метастабильны, прямой радиационный переход из них в основное состояние $1S_0$ запрещен. Энергия данных состояний близка к состояниям неона с электронными конфигурациями $2p^5 4s$ и $2p^5 5s$, поэтому при столкновениях атомов неона с возбужденными атомами гелия, будет происходить резонансная передача энергии между атомами, и возбужденные состояния неона будут заселяться.

Некоторый вклад в заселенность лазерных уровней неона дает также прямой электронный удар. Из возбужденных состояний неона $2p^5 4s$ и $2p^5 5s$ разрешен радиационный переход в состояние $2p^5 3p$, дающий излучение с длинами волн $\lambda_1 = 6328 \text{ \AA}$ и $\lambda_2 = 11523 \text{ \AA}$, соответственно. Генерация лазерного излучения возможна и на той и на другой длине волны. Поскольку возбужденные состояния неона $3s, 2s, 2p$ являются сложными мультиплетами, то между компонентами многих из них возможны переходы. Следовательно, возможна генерация с большим числом линий (общее число линий генерации неона достигает 27 в диапазоне $0,6328 - 5,4087 \text{ мкм}$).

Гелий – неоновый лазер работает по четырехуровневой схеме, что дает возможность осуществления стационарной генерации излучения. При этом необходимым является определенное значение добротности резонатора. Используя зеркала с различными диэлектрическими покрытиями можно на одной и той же трубке наблюдать генерацию на различных длинах волн. Зеркала резонатора могут быть либо плоскими (как в интерферометре Фабри–Перо), либо сферическими, с радиусом кривизны значительно превышающим длину резонатора, либо комбинацией того и другого типа. Сферические зеркала имеют ряд преимуществ, связанных с более простой их юстировкой по сравнению с плоскими, где необходимо выдерживать параллельность с точностью до нескольких секунд. При юстировке зеркала выставляют, что увеличивает их коэффициент отражения и уменьшает порог генерации.

Со времени появления гелий-неонового лазера генерация получена более чем на 450 различных переходах между уровнями нейтральных атомов 34 химических элементов. Возбуждение непрерывной генерации происходит в положительном столбе тлеющего разряда при плотности тока $100-200 \text{ А/см}^2$. Для импульсной генерации используется импульсный разряд с послесвечением. Плотность тока в импульсном разряде может достигать 300

A/cm^2 , а в случае импульса с крутым фронтом – сотен и тысяч A/cm^2 , что создает высокую пиковую мощность генерации.

По сравнению с газовыми лазерами на нейтральных атомах ионные лазеры обладают большей выходной мощностью. Генерация на ионизированных газах впервые была получена американским физиком У.Бриджесом в 1964 году. Инверсия населенностей создается между уровнями энергии атомарных ионов в электрическом разряде. Относительно большая концентрация ионов обеспечивается высокой плотностью тока, который в ионных лазерах достигает десятков тысяч A/cm^2 . Поэтому электрический разряд осуществляется в тонких капиллярах (диаметром до 5 мм), обладающих высокой теплопроводностью (например, из бериллиевой керамики). К.п.д. ионных лазеров невысок, менее 0,1%.

Генерация наблюдается на 440 переходах ионов 29 элементов. Наиболее мощная генерация (несколько сотен Вт) получена в сине-зеленой области спектра ($\lambda=0,4880$ мкм, $\lambda=0,5145$ мкм) на ионах Ar^{2+} , в желто-красной (0,5682 мкм, 0,6471 мкм) на ионах Kr^{2+} , на УФ линиях Ne^{2+} , Ar^{3+} и Kr^{3+} . Выходная мощность ионных лазеров резко зависит от тока разряда.

В особую обширную группу выделяются газовые лазеры на парах металлов (атомы и ионы), перспективные для получения высоких к.п.д. Для этого необходимо, чтобы опустошение нижнего лазерного уровня происходило не за счет спонтанных переходов, а в результате столкновений с атомами и молекулами (столкновительные газовые лазеры). Атомы некоторых металлов обладают благоприятной для этого структурой уровней. Для них квантовый выход может достигать 0,7. Генерация осуществлена для 27 металлов; наилучшие результаты получены на парах меди Cu^+ : $\lambda=510,5$ нм, $\lambda=578,2$ нм, средняя мощность 43,5 Вт, пиковая мощность 200 Вт, к.п.д. 2-3%. Чрезвычайно высокий коэффициент усиления позволяет использовать лазеры на парах металлов в качестве квантовых усилителей света (без резонатора) и в лазерном проекционном микроскопе. Распространены также газовые лазеры на парах кадмия Cd^{2+} , инверсия населенностей в которых образуется в результате передачи энергии от возбужденных атомов He . Гелий-кадмиевый лазер позволяет получить в непрерывном режиме мощность генерации 10-50 мВт на линии $\lambda=441,6$ нм (синяя область) и несколько мВт в УФ области при к.п.д. около 0,1%.

Лазеры на атомарных газах сравнительно маломощны. Высокая мощность излучения достигается в молекулярных лазерах, в частности, в лазерах на двуокиси углерода, изобретенных К. Пателом в 1964 г. При этом инверсная заселенность создается, в основном, на колебательных и вращательных уровнях молекул, что приводит к увеличению длины волны излучения (8-12 мкм), так что генерация осуществляется в ИК - диапазоне.

Выбор двуокиси углерода в качестве рабочего тела обусловлен следующими причинами: молекула CO_2 является одной из простейших трехатомных молекул и ее колебательно-вращательные состояния хорошо изучены. Молекула CO_2 имеет симметричную линейную конфигурацию и характеризуется тремя степенями свободы. Одна степень свободы связана с

симметричными колебаниями атомов вдоль оси молекулы. Такой тип колебаний называется симметричным растяжением и обозначается ν_1 . Другой симметричный тип представляют колебания атомов перпендикулярно оси. Его называют деформационным типом колебаний и обозначают ν_2 . Наконец, существует асимметричный тип колебаний вдоль оси, обозначаемый ν_3 . Согласно правилам квантовой механики колебания независимы, их энергии квантуются и различны. Таким образом, молекула двуокиси углерода может быть возбуждена в состояние, являющееся некоторой комбинацией трех отдельных типов колебаний ($\nu_1 \nu_2 \nu_3$). По ряду причин, таких, как время жизни молекулы и вероятность возбуждения, в качестве верхнего лазерного уровня выбирают (001), а уровни (100) и (020) образуют нижние лазерные уровни. Молекулы, достигающие нижних лазерных уровней, переходят в основное состояние, излучая или в результате столкновений, через уровень (010). Колебательно-вращательный переход (001)→(020) дает инфракрасное излучение с длиной волны 10,6 мкм, а переход (001)→(020) излучение с $\lambda=9,6$ мкм. Квантовый КПД на этих переходах весьма высок 40-45%. В чистой двуокиси углерода накачка с помощью газового разряда неэффективна, поскольку электронные столкновения с молекулами CO_2 приводят к возбуждению не только верхнего лазерного уровня ($00\nu_3$), но и других, понижая при этом как КПД, так и выходную мощность. Селективное возбуждение верхнего лазерного уровня осуществляется, если к двуокиси углерода добавить азот. Азот – двухатомная молекула и имеет только одну колебательную степень свободы, причем колебательные уровни основного электронного состояния не могут отдавать энергию излучательно и являются крайне долгоживущими. В разряде в парах азота при низком давлении на уровень $\nu = 1$ может возбудиться около 30% молекул. Энергия этого уровня молекулы азота почти совпадает с энергией уровня (001) молекулы CO_2 , так что можно ожидать эффективного переноса колебательной энергии от азота к двуокиси углерода в результате столкновений. Кроме азота к двуокиси углерода с целью повышения выходной мощности и КПД необходимо добавить еще и гелий, что увеличивает скорость расселения нижнего колебательного уровня молекулы CO_2 и увеличивает скорость возбуждения уровня (001) либо прямо в результате электронного удара, либо косвенно за счет роста скорости возбуждения молекул азота. При давлении двуокиси углерода 3 мм рт.ст., азота 3 мм рт.ст. и гелия 20 мм рт.ст. удастся получить непрерывную мощность 80 Вт на метр длины разряда на длине волны 10,6 мкм. Рабочий КПД в этом случае составляет 20 %. Типичный лазер на CO_2 имеет длину около 2 м и может давать в непрерывном режиме мощность около 150 Вт. Ничто не мешает изготовлению длинных лазеров для получения много более высокой выходной мощности, которая растет линейно с длиной трубки. Кумар Пател так описывает свои впечатления от изогнутого лазера «Raytheon Company» длиной 600 футов и мощностью 8,8 кВт: «выходная мощность такого лазера догоняет мечты научной фантастики, а тепловой эффект при этом определенно внушает некоторый ужас».

Генерация в УФ – части спектра достигается в эксимерных лазерах, работающих на электронных переходах молекул, существующих только в возбужденном состоянии. Эксимерные молекулы представляют собой коротко живущие соединения возбужденных атомов инертных газов (*Ar, Kr, Xe*) друг с другом, галогенами F, Br, Cl или кислородом. В основном состоянии атомы отталкиваются, разваливая молекулу, и инверсия населенностей создается благодаря эффекту опустошения нижнего уровня. Эксимерные лазеры используют импульсные источники возбуждения – мощные электронные пучки или импульсный поперечный разряд. Наиболее эффективны и хорошо изучены эксимерные лазеры, на *ArF* ($\lambda = 1933 \text{ \AA}$), *KrF* ($\lambda = 2484 \text{ \AA}$), *XeF* ($\lambda = 3511 \text{ \AA}$), выходная энергия которых достигает килоджоуля при КПД 10% и длительности импульса 10^{-8} сек . Лазеры этого типа перспективны для селективной лазерной фотохимии, лазерного разделения изотопов и лазерного термоядерного синтеза.

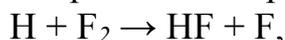
В газодинамических лазерах, построенных в 1966 году в ФИАНе А.М.Прохоровым, инверсия населенностей создается в системе колебательных уровней молекул газа путем адиабатического охлаждения газовых масс, движущихся со сверхзвуковой скоростью. Лазеры данного типа состоят из нагревателя, сверхзвукового сопла (или набора сопел, образующих сопловую решетку), оптического резонатора и диффузора. В нагревателе происходит тепловое возбуждение специально подобранной смеси газов (в результате сгорания топлива или подогрева с помощью электрических разрядов и ударных волн). При течении газа в сверхзвуковом сопле смесь быстро охлаждается; при этом нижние уровни энергии опустошаются быстрее, чем верхние, и, как следствие, образуется инверсия населенностей и генерация когерентного излучения. Диффузор предназначен для торможения потока газа и повышения его давления. Самые мощные газодинамические лазеры работают в ИК области спектра $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ на переходах между колебательными уровнями молекулы *CO₂* (в смеси с азотом и парами воды или гелием). В этих газодинамических лазерах наиболее просто получить генерацию в продуктах сгорания углеводородных топлив. Получена также генерация в ИК области на молекулах *CO*, *N₂O* и *CS₂*. Хотя к.п.д газодинамических лазеров невелик - около 1 %, (что связано с низкой эффективностью теплового возбуждения и переходом основной доли энергии в кинетическую энергию молекул), они дают возможность непрерывной генерации значительной мощности в сотни кВт. Перспективно создание газодинамических лазеров на переходах между электронными уровнями атомов и молекул, излучающих в видимой области спектра (фоторекомбинационные и плазмодинамические лазеры).

В химических лазерах инверсия населенностей образуется в результате химических реакций. Помимо высокой мощности генерации и к.п.д. к достоинствам химических лазеров относится также возможность получения генерации на большом числе переходов в широкой области ИК спектра. Возможность создания лазеров данного типа основана на том, что продукты

многих экзотермических химических реакций образуются преимущественно в возбужденном состоянии. Большинство химических лазеров работает на колебательных спектрах двухатомных молекул. Возбуждение осуществляется в результате экзотермической реакции замещения:



Чаще всего это реакции фтора с водородом, дейтерием, углеводородами и т.п. Причем значительная часть δ выделяющейся энергии $\Delta\epsilon$ идет на возбуждение колебательных уровней молекулы АВ. В результате образуется неравновесный газ двухатомных молекул АВ, в котором средняя величина колебательной энергии значительно превышает величину энергии, приходящейся на поступательные и вращательные степени свободы молекул. Такой неравновесный газ является активной средой с инверсной населенностью для большого числа колебательных переходов. Типичные значения выделяющейся энергии $\Delta\epsilon$ составляют 31-46 ккал/моль, доля энергии δ - 0,59-0,71, примерный диапазон длин волн λ 2,8-5,8 мкм. Например, для цепной реакции хлора с водородом:



$\Delta\epsilon=33,7$ ккал/моль, $\delta=0,68$, $\lambda=4,3-5,4$ мкм. Для работы химического лазера требуется создать некоторое количество химически активных свободных радикалов (атомов А). Для этого используется прямой нагрев, приводящий к термической диссоциации вещества; облучение УФ или видимым светом, приводящее к частичной фотодиссоциации исходных продуктов; химические реакции, сопровождающиеся появлением свободных радикалов; газовый разряд, в котором частичная диссоциация компонент происходит в результате столкновений молекул с электронами; электронная бомбардировка и другие. Так как в результате реакций, приводящих к возбуждению химического лазера, происходят необратимые изменения химического состава исходных веществ, необходимым условием длительной работы химического лазера является непрерывное возобновление рабочего вещества.

Основные параметры, характеризующие эффективность химического лазера – его химический к.п.д η_x отношение энергии лазерного излучения, к величине энергии, выделяющейся в результате химической реакции, и электрический к.п.д η_e отношение энергии лазерного излучения к энергии, затрачиваемой на инициирование химической реакции. Так как энергия, требующаяся для инициирования многих экзотермических реакций, меньше энергии, которая выделяется в результате протекания таких реакций, то величина η_e не имеет ограничений сверху и может превышать 100% (например, для HF лазера $\eta_e = 95\%$). Однако, для химических лазеров на основе цепных реакций η_x относительно невелико – 1-3%, поскольку время протекания цепной реакции оказывается много больше времени разрушения инверсной населенности в результате межмолекулярных соударений. В связи с этим наиболее мощные химические лазеры на HF(DF), обладающие высоким η_x до 10%, работают на основе простых реакций замещения. Максимальная энергия излучения HF-лазеров в импульсном режиме

превышает 5 кДж при длительности импульса 30 нс. Наиболее мощные химические HF-лазеры непрерывного действия работают при прокачивании активного вещества через резонатор со сверхзвуковой скоростью и обладают выходной мощностью в несколько кВт при η_e около 4%.

Действие *лазеров на свободных электронах* основано на излучении электронов, колеблющихся под действием внешних электрического и (или) магнитного поля и перемещающихся с релятивистской поступательной скоростью в направлении распространения излучаемой волны. Благодаря эффекту Доплера частота излучения во много раз превышает частоту колебаний электронов и может попадать в диапазон от СВЧ до УФ. Электрон в лазере на свободных электронах излучает в элементарном акте квант, энергия которого во много раз меньше исходной энергии частицы. Это позволяет каждому электрону в процессе взаимодействия с волной излучить много квантов (10^3 - 10^8). Поэтому движение и излучение частиц может быть описано уравнениями классической электродинамики, а сами лазеры на свободных электронах являются по существу классическими приборами, родственными лампе бегущей волны, клистрону и другим электрическим генераторам СВЧ. Вынужденному излучению в лазерах на свободных электронах (как и в других электронных приборах) при классическом описании отвечает самосогласованный процесс, включающий в себя группирование электронов в сгустки под действием резонансной «затравочной» волны и последующее усиление этой волны в результате когерентного излучения образовавшихся электронных сгустков. При квантовом описании возможность преобладания вынужденного излучения над поглощением объясняется небольшим различием частот волн, которые электрон способен излучить ω_e и поглотить ω_a . Это различие обусловлено отдачей, испытываемой электроном при излучении и поглощении кванта, а также в ряде случаев отклонением от эквидистантности спектра колебательных уровней электронов (например, уровней электрона в однородном магнитном поле). Так как в реальных условиях уширение спектральной линии, обусловленное конечным временем нахождения электрона в пространстве взаимодействия с волной (естественная ширина) существенно больше $\omega_e - \omega_a$, то вынужденное излучение и поглощение раздельно не наблюдаются, а преобладание излучения над поглощением имеет место для волны, частота которой смещена в сторону ω_a . Наиболее коротковолновыми являются разновидности лазера на свободных электронах, в которых колебательное движение электронам сообщается пространственно-периодическим статическим полем ондулятора (так называемый убитрон), либо полем мощной НЧ волны накачки (комптоновский лазер или скаттрон). Эти способы накачки близки по характеру воздействия на электроны, поскольку периодическое статическое поле воспринимается движущейся частицей как волна. При иных способах накачки осцилляторной энергии в электронный поток возможны и другие виды вынужденного тормозного излучения электронов: а) вращающихся в однородном магнитном поле (мазер на циклотронном резонансе); б)

колеблющихся в поперечно-неоднородном электростатическом поле (строфотрон) и другие. Кроме того, лазеры на свободных электронах могут быть основаны на различных вариантах черенковского излучения и переходного излучения частиц, движущихся равномерно и прямолинейно в пространственных периодических структурах; при этом колеблются не электроны исходного пучка, а их зеркальные изображения в структурах. Достоинством лазеров на свободных электронах является возможность плавной перестройки частоты генерации в широких пределах изменением поступательной скорости движения электронов или угла между излучаемой волной и направлением движения частиц. Эффективность преобразования энергии пучка в излучение (электронный к.п.д.) ограничивается выходом теряющих энергию частиц из резонанса с волной. На возможность излучения коротких волн путем доплеровского преобразования частоты излучения предварительно сформированных электронных сгустков колеблющихся частиц впервые указали В.Л.Гинзбург и американский физик Г.Моц в конце 40-х годов. Однако предложение о получении таким способом вынужденного излучения было сформулировано позднее, уже после развития теории вынужденного излучения в системах классических электронных осцилляторов и экспериментальной реализации основанных на этом принципе слабoreлятивистских электронных мазеров. Впервые лазер на свободных электронах в ИК диапазоне был реализован в США Дж.Мейди с сотрудниками на базе Станфордского линейного ускорителя электронов в 1976 году.

Активно ведутся исследования возможностей создания *рентгеновского лазера*, который позволил бы получать трехмерные голографические изображения микрообъектов, размерами порядка атомных, а также, вследствие возможности фокусировать когерентное излучение на площадках с атомными размерами, манипулировать отдельными атомами, удалять или перемещать, создавая структуры на атомном уровне. Тем самым, рентгеновский лазер, в случае его создания, заменил бы неосуществимый рентгеновский микроскоп (в силу отсутствия зеркал рентгеновского излучения), но и в некоторых аспектах превосходил бы существующие туннельные и электронные микроскопы.

Не обсуждая использование в качестве активных частиц метастабильных состояний атомных ядер, что выходит за пределы нашего пособия и к тому же пригодного практически только для военных целей, можно указать еще две возможности реализации рентгеновского лазера. Первая из них возникает в условиях ядерного взрыва, когда некоторая часть вещества полностью ионизируется и превращается в плазму из голых ядер и электронов. Охлаждаясь, такая плазма теряет энергию за счет тормозного некогерентного излучения электронов, которые начинают захватываться ионами. При этом вероятность захвата на высоко лежащие уровни существенно больше, чем на низкие, что автоматически приводит к инверсной заселенности. Отсутствие резонатора требует больших значений коэффициента усиления (так называемый, режим сверхсветимости). Данный

тип накачки рентгеновского лазера был испытан во время подземного взрыва ядерного устройства в ноябре 1981 года в Неваде (США). Измеренные параметры рентгеновского излучения в том эксперименте составили: длина волны $\lambda = 1,4 \text{ нм}$, длительность импульса линии 10^{-5} сек , энергия импульса порядка 100 КДж .

Другой способ создания рентгеновского лазера дают методы нелинейной оптики. Использование мощных импульсных лазеров, излучение которых фокусируется на нелинейную газовую среду, в результате многофотонного поглощения позволяет получить излучение на n -й гармонике, т.е. с частотой в n -раз превосходящий частоту исходного лазерного излучения. Так, наносекундный лазер мощностью $10^6 - 10^{12} \text{ Вт}$ позволяет получить генерацию высших гармоник вплоть до 141-й, что соответствует длине волны $\lambda = 7 \text{ нм}$. Данная установка обеспечивает интенсивность излучения в околофокальной плоскости до 10^{16} Вт/см^2 , что соответствует значению напряженности электрического поля выше внутриатомной. Излучение на 141-й гармонике умеренно фокусируется, хотя мощность его невысока и соответствует нескольким сотням квантов на импульс.

Особенностям структуры и работы отдельных типов лазеров посвящено значительное количество оригинальных статей и монографий, поэтому в данном пособии мы не имеем возможности все это отразить, ограничившись лишь отдельными фрагментами, отсылая читателей к специальной литературе.

Применения лазеров многообразны. Способность лазеров концентрировать световую энергию в пространстве, во времени и в спектральном интервале может быть использована двояко:

- нерезонансное взаимодействие мощных световых потоков с веществом в непрерывном и импульсном режимах (лазерная технология, лазерный термоядерный синтез и другие);
- селективное воздействие на атомы, ионы, молекулы и молекулярные комплексы, вызывающие процессы фотодиссоциации, фотоионизации, фотохимические реакции (лазерная химия, лазерное разделение изотопов и другие). Для лазерного ввода энергии в вещество характерна точная локализация, дозированность и стерильность.

Лазеры применяются в медицине как бескровные скальпели, при лечении глазных и кожных заболеваний и других. Лазерные локаторы (лидары) позволяют контролировать распределение загрязнений в атмосфере на различных высотах, определять скорость воздушных течений, температуру и состав атмосферы. Лазерная локация уточнила значение астрономической постоянной и способствовала совершенствованию систем

космической навигации, расширила знания об атмосферах и строении поверхности Луны, Венеры, Меркурия и Марса. С появлением лазеров связано рождение новых разделов науки, техники и технологии, таких как квантовая электроника, квантовая и нелинейная оптика, голография и других. Одним из возможных путей решения проблемы управляемого термоядерного синтеза является использование лазеров для нагрева плазмы.

Технологические процессы (сварка, резка и плавление металлов) осуществляются главным образом газовыми лазерами, обладающими высокой средней мощностью. В металлургии лазеры позволяют получить сверхчистые металлы, выплавляемые в вакууме или в контролируемой газовой среде. Для точечной сварки используются и твердотельные лазеры. Сверхкороткие импульсы лазерного излучения используются для изучения быстропротекающих процессов, сверхскоростной фотографии и т.п. Сверхстабильные лазеры являются основой оптических стандартов частоты, лазерных сейсмографов, гравиметров и других точных физических приборов.

Лазеры с перестраиваемой частотой (например, лазеры на красителях) произвели революцию в спектроскопии, существенно повысили разрешающую способность и чувствительность метода вплоть до наблюдения спектров отдельных атомов (лазерная спектроскопия, начало которой было заложено в 1960-61 годах А.Шавловым и Н.Бломбергом, удостоенных Нобелевской премии по физике 1981 года). Вклад в развитие лазерной спектроскопии и создание квантовых стандартов частоты Д.Холла и Т. Хэнша был отмечен Нобелевской премией 2005 года. (Нобелевскую премию с ними разделил патриарх квантовой оптики Рой Глаубер).

Гигантская гребенка

В настоящее время система СИ работает с шестью, а не с семью основными единицами. Метр понижен в должности до производной единицы, а значение времени и частоты возросло еще больше. С этим связана длинная история, в которой основным единицам системы СИ был брошен вызов «со дна сосуда Дьюара», когда были достигнуты замечательные успехи, давшие квантовый эталон напряжения, основанный на эффекте Джозефсона (Нобелевская премия 1973 года) и квантовый эталон сопротивления, основанный на целочисленном квантовом эффекте Холла, открытом К. фон Клитцингом (Нобелевская премия 1985 года). Кроме того, соотношение U^2/R дает электрическое определение единице Ватт в системе СИ. Недавно использование одноэлектронного транзистора открыло возможность цифрового счета заряда, протекающего в секунду, а это ведет к определению Ампера, единицы тока в системе СИ. Такое взаимопроникновение квантовой физики и метрологии стало горячей темой последнего времени. Замечательные успехи метрологии вместе с достижениями космологии и астрономии поддерживают и мотивируют наше стремление разобраться, точны ли и неизменны во времени те величины, которыми мы пользуемся для описания физического мира. На первый план выходят стандарты времени

(или частоты) и причина этого ясна: время является наиболее продуктивной метрологической переменной. В этой связи особое значение имеют работы Дж.Л.Холла и Т. Хэнша, удостоенные Нобелевской премии 2005 года.

Холл Джон Льюис (Hall John Lewis) – американский физик, член Национальной АН (1984). Родился 21 августа 1934 года в Денвере (Колорадо). В 1956 окончил Технологический институт Карнеги в Питтсбурге, штат Пенсильвания, 5 лет спустя там же защитил докторскую диссертацию. С 1961 года — в Национальном бюро стандартов (теперь — Национальный институт стандартов и технологий). Одновременно с 1964 года— в Объединённом институте экспериментальной астрофизики в Боулдере, штат Колорадо, с 1967 года – профессор Колорадского университета. Является основателем и владельцем коммерческой фирмы, специализирующейся на проведении сложных физических измерений с применением высокоточной лазерной техники. Работы связаны с лазерной спектроскопией, созданием лазеров с высокой степенью монохроматичности и когерентности. Разработал (с Т. Хэншем) метод оптической гребенки частоты, позволивший создать прецизионные приборы для измерения и стандартов частоты на их основе. Созданные ими приборы позволяют проводить измерения с точностью до 18 знаков после запятой. Разработанные ими приборы и методы были применены для точного измерения физических постоянных и их зависимости от времени. Нобелевская премия 2005 года (совместно с Т. Хэншем и Р. Глаубером). Премия Ч.Таунса (1984), премия Дэвиссона – Джермера (1988), премия И. Раби (2004) и другие [45,48].

Хэнш (Хёни) Теодор Вольфганг (Hansch Theodor Wolfgang) — немецкий физик. Родился 30 октября 1941 года в Гейдельберге. Окончил Гейдельбергский ун-т (1966, степень доктора — 1969). В 1969 – 70 годах — в Гейдельбергском ун-те. С 1969 года— в Стэнфордском ун-те, США (в 1970 – 72 годах — ассистент А. Шавлова, в 1975 – 86 годах — профессор). С 1986 года — в Германии, директор Института квантовой оптики имени Макса Планка. Профессор Университета Людвиг-Максимилиана в Мюнхене (в 2001–2002 годах—декан физического факультета). Работы в области квантовой оптики. В 1970 году создал новый тип лазера с высокой монохроматичностью и когерентностью (с точностью до миллионной доли), что позволило измерять частоты с гораздо более высокой точностью. В 1990-х годах разработал метод оптической частотной гребенки, позволивший повысить точность измерений частоты до триллионной доли и создать новые прецизионные приборы. В частности искать возможные изменения фундаментальных физических констант в течение длительных промежутков времени. Нобелевская премия 2005 года (совместно с Дж. Холлом и Р. Глаубером) "за развитие прецизионной лазерной спектроскопии, в частности - за методы комбинационной лазерной спектроскопии в оптическом диапазоне".

Медаль Майкельсона (1986), Премия Г.В. Лейбница (1988), медаль Эйнштейна (1995), приз А. Шавлова (1996), премия А. Шавлова (2000), медаль Герлаха (2000), медаль Маттеучи (2002), премия И.Раби (2005), медаль Р. Дизеля (2006) и другие [45,48].

Глаубер Рой (Glauber Roy J.) – американский физик. Родился 1 сентября 1925 года в Нью-Йорке. В 1949 году окончил Гарвардский университет (США). С 1976 года профессор физики этого университета.

Родоначальник квантовой оптики. Работы Глаубера по квантовой теории оптической когерентности позволили устранить существовавшее противоречие между описанием свойств света, исходящего от тепловых источников, и лазерного (когерентного) излучения.

Нобелевская премия 2005 года Премии М. Борна (1985), Гумбольта (1989), Хейнемана (1996) и другие. Иностраннный член Лондонского королевского общества (1997) [45,48].

Четыре направления лазерной технологии объединились в 1999-2000 годах. Первое из них - это реализация повторяющихся последовательностей все более коротких импульсов, второе - поиск путей генерации как можно более стабильных во времени неизменных частот. Соединить преимущества сверхбыстрых и сверхстабильных лазеров удалось тогда, когда обнаружилось, что оптические волокна со специально созданной микроструктурой (третье направление) настолько нелинейны, что могут преобразовывать фемтосекундные лазерные импульсы в белый свет, охватывающий целую оптическую октаву. При этом впервые оказалось возможным генерировать частотную гребенку, заполняющую интервал частот, равный низшей частоте гребенки, и выразить этот интервал как целое кратное от частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера. Эта «гребенка» - связь между стандартом частоты радиодиапазона и всеми оптическими стандартами частоты создавалась вместе со становлением методов повышения чувствительности, которые явились четвертым направлением. Объединение этих четырех технологий привело к резкому росту точности измерений частоты и открыло путь к более точной проверке заботливо хранимых физических принципов, таких как стабильность во времени фундаментальных физических констант (например, постоянной тонкой структуры, скорости света, отношений некоторых атомных масс и т.д.) Технология стабильных лазеров позволяет сейчас настолько точно синхронизовать два независимых фемтосекундных лазера, что их излучение воспринимается как излучение одного лазера.

Таким образом, в настоящее время источники стабильных частот доступны в интервале от 10 мкм (30 ТГц) до ~ 280 нм (~ 1 ПГц), что выходит далеко за рамки видимого диапазона. Созданы системы, в которых удвоенная частота одного лазера сравнивается с суммой далеко отстоящих частот двух других лазеров. Остаточный дефицит частоты в несколько ТГц, можно

синтезировать, используя гребенку Коуроги, основанную на использовании радиочастотного модулятора, помещенного внутрь резонатора.

Один из возможных способов уширения спектральной полосы оптической гребенки состоит в использовании внутрирезонаторного усиления для компенсации оптических потерь в модуляторе, например, поместив внутри резонатора кристалл параметрического генератора света. При частотной модуляции легко наблюдаются колебания и генерация сотен боковых полос.

В заключительные дни последнего тысячелетия лазерное сообщество почти случайно получило от лазерной промышленности исключительно важный подарок. Без него частотные гребенки едва ли получили бы широкое распространение. Этим подарком было появление мощных лазеров видимого диапазона, основанных на удвоении частоты твердотельного лазера на неодиме с диодной накачкой. Их сразу стали использовать вместо довольно шумных и сложных аргоновых ионных лазеров, которые широко применялись для накачки твердотельных лазеров. Эти новые лазеры имели очень низкий уровень остаточного амплитудного шума. Это свойство является ключевым при работе лазеров с самосинхронизацией мод: лазеры на титанате сапфира самосинхронизируются из-за индуцированной собственным излучением оптической линзы, которая уменьшает потери резонатора, когда все лазерные моды синхронизованы и образуют «оптическую пулю» в активной среде. Эта нестационарная линза формируется поперечным градиентом показателя преломления, индуцируется оптической пулей и может существовать только в ее присутствии. Таким образом, резонатор лазера изначально настраивается так, что для образования лазерных мод с низкими потерями требуется дополнительная фокусировка, а после начала работы в импульсном режиме поддерживается стабильная самосинхронизация мод. Если длительность импульса составляет всего 10 фсек при периоде повторения ~ 10 нсек, то при идеальной синхронизации отношение пиковой мощности к средней составляет $\sim 10^6$. Типичный лазер излучает $\sim 0,5$ Вт через зеркало с коэффициентом пропускания 5%. Следовательно, средняя внутренняя мощность равна 10 Вт, а пиковая - 10 МВт, и она фокусируется в пятно радиусом ~ 14 мкм на лазерный кристалл из титаната сапфира. При этом площадь поперечного сечения активной области равна $3 \cdot 10^{-6}$ см², так что при пиковой мощности 10 МВт получаем интенсивность 3 ТВт см⁻². Соответствующее электрическое поле составляет 10 % от межатомного поля в кристалле, так что не удивительно, что при этом оптически индуцируется значительное увеличение показателя преломления (оптический эффект Керра). Из-за этого механизма в благоприятном случае ширина линий лазерной гребенки без стабилизации частоты лежит в пределах 3-10 кГц.

Десятикратное увеличение интенсивности дает трехкратный рост поля в кварцевом волокне, доводя его фактически до межатомного, и создает условия для сильных нелинейных взаимодействий. Все спектральные компоненты лазера смешиваются друг с другом, радикально уширяя спектр.

Структура волокна такова, что оптические частоты, занимающие широкий диапазон, распространяются по волокну почти с одинаковой скоростью, что сохраняет фазовый синхронизм в данном частотном преобразовании и приводит к накоплению мощности на новых частотах. По существу входной спектр на нескольких сантиметрах длины волокна преобразуется в белый свет. На самом деле свет не совсем белый, поскольку в нем еще сохраняется основной ритм исходного лазера, например 100 МГц. Поэтому в действительности происходит генерация гребенки линий в спектре с шириной компонент, связанной с используемой спектральной разрешающей силой. В конце концов, на уровне ширин порядка 1 кГц или меньше процессы фазовой модуляции, проявляющиеся в широкой полосе во всех лазерах, приводят к уширению линий (если не включена система стабилизации). Такой метод гребенки надежно работает для измерений с точностью более чем 18 знаков.

Объяснение частотных гребенок может быть таким. Пусть есть синусоидальное напряжение или поле, тогда зависимость от времени представляет собой гладкие колебания, а в зависимости от частоты есть только одна Фурье-компонента, узкая линия. Добавим теперь в эту волну гармоники. В спектре появятся новые линии в точности на частотах гармоник, а временная зависимость станет довольно сложной. Подбирая фазы этих гармоник, мы можем начать синтезировать некое возмущение по временной зависимости, напоминающее импульс, точнее, серию одинаковых импульсов. Продолжим увеличение числа гармоник. Чем больше мы их добавляем, тем более короткий импульс мы можем синтезировать и, конечно, тем богаче спектр этого сигнала. Продолжая добавлять когерентные гармоники исходной синусоиды, мы получим огромное количество линий в спектре. Если частота исходного источника равна 100 МГц и мы хотим воспроизвести описанный подход и дойти до оптического диапазона, потребуется несколько миллионов гармоник. При правильном подборе фаз длительность импульса может быть в 10^6 раз меньше, чем период исходной синусоиды. Итак, мы действительно можем ожидать очень коротких импульсов и очень широкой спектральной полосы.

Эта ситуация хорошо согласуется с результатом Фурье-анализа одиночного импульса. Такой импульс имеет Фурье-компоненты на всех частотах с почти постоянными амплитудами, которые постепенно уменьшаются на частотах выше частоты, равной обратной длительности импульса. Если мы хотим проанализировать спектр последовательности повторяющихся импульсов, то нам потребуется спектрометр, полоса пропускания которого уже, чем частота следования импульсов - иначе мы не разрешим структуру гармоник. Однако узкая полоса пропускания соответствует большому времени отклика. Поэтому сигнал на выходе спектрометра, настроенного на определенную длину волны, будет представлять результат когерентного сложения вкладов от многих импульсов. Отдельный импульс имеет широкий и непрерывный спектр, а спектральные амплитуды для многих импульсов интерферируют, что

приводит к модуляции спектра. Добавляя со временем большее число импульсов (при более высоком спектральном разрешении), мы получим более глубокую модуляцию. В итоге, мы получим Фурье-гармоники в виде очень узких эквидистантных линий. Пока мы не столкнемся с такими техническими проблемами, как фазовый шум в частоте следования, наблюдаемые линии будут тем острее, чем выше будет разрешение при анализе сигнала. Так что спектр действительно напоминает "гребенку".

На самом деле в отношении фемтосекундных лазеров, используемых при генерации этих импульсов, имеется еще один интересный момент. Лазер может генерировать колебания на многих модах своего резонатора, определяемых условием воспроизведения фазы после полного обхода резонатора. Все вовлеченные моды имеют свое продольное квантовое число, означающее, сколько полных оптических периодов содержится в замкнутой петле. Ясно, что это условие содержит фазовую скорость, которая зависит от длины волны, и предполагает усреднение по многим оптическим элементам, через которые проходит свет. Другое практически важное обстоятельство связано с тем, что лазер работает в самоподдерживающемся режиме повторяющихся импульсов. Фактически это означает, что оптические потери резонатора могут быть сделаны достаточно большими, чтобы подавлять генерацию до тех пор, пока фазы мод резонатора не подберутся таким образом, что сформируется пространственная дельта-функция. Особенно важно, чтобы импульс был коротким при прохождении кристалла титаната сапфира, поскольку короткому импульсу соответствует очень высокая пиковая мощность, которая взаимодействует с материалом лазерного стержня по квадратичному закону (оптический эффект Керра), образуя положительную линзу с максимумом показателя преломления на оси, где интенсивность максимальна. Таким образом, стабильная самоорганизующаяся генерация импульсов происходит в лазере с избыточно большими дифракционными потерями (не хватает положительной оптической силы линзы), но эта ситуация периодически исправляется световой пулей, которая, используя свое воздействие на кристалл, увеличивает показатель преломления и в необходимой мере уменьшает потери.

Огибающая импульса, которая описывает эту световую пулю, является результатом суперпозиции многих лазерных мод, и если временные задержки зависят от длины волны, форма огибающей будет эволюционировать. Мы обсуждаем сейчас понятие групповой скорости, согласно которому форма возмущения не меняется во времени, только если все частоты распространяются с одинаковой скоростью. В любом реальном лазере необходимо использовать некоторые оптические элементы, которые должны компенсировать задержку голубого света относительно красного. Чтобы получить как можно более короткий импульс, необходимо, чтобы времена обхода резонатора были строго одинаковыми, хотя, как нетрудно понять, задача усложняется, если учесть, что лазерный импульс сам влияет на времена задержки. В любом случае свет, излучаемый из выходного зеркала

лазера, представляет собой регулярную последовательность коротких импульсов, которые при спектральном анализе имеют структуру гребенки. Однако каждый раз, когда импульс приходит на поверхность зеркала, быстрые оптические колебания световой волны (формирующей этот импульс) имеют, вообще говоря, разные фазы. От импульса к импульсу фаза смещается то вперед, то назад, так что гребенка оптических частот может быть немного смещена относительно идеальных фурье-гармоник, которые мы перед этим рассматривали. В обычном случае имеется постоянный сдвиг фазы в каждом импульсе, при котором сдвиг фазы относительно гармоники на частоте следования импульсов происходит с постоянной скоростью. Была разработана электронно-оптическая схема, названная схемой «самопривязки», которая позволяет стабилизировать эту добавочную частоту - частоту расстройки между несущей и огибающей - так чтобы ее отношение к частоте следования было равно определенному задаваемому числу. Например, если его выбрать равным нулю, мы получим чисто гармоническую гребенку. Если выбрать это отношение равным $1/2$, сдвиг гребенки будет составлять $1/2$ от базовой частоты повторения, которая сама, конечно, равна промежутку между линиями гребенки.

Экспериментально используется, как правило, фемтосекундный титан-сапфировый лазер с синхронизацией мод и регенеративным усилителем. Лазерный пучок от него, сфокусированный в стеклянную пластинку, вызывает генерацию белого света - континуума, который с помощью призмы раскладывается на все цвета радуги. Подобные импульсы белого света получаются в результате совместного действия самофокусировки, фазовой самомодуляции и других нелинейно-оптических процессов. Уже в течение долгого времени такие импульсы использовались для исследования быстропротекающих процессов по схеме возбуждение-зондирование. Поразительную картину представляла собой почти лазерная спекл-структура радуги цветов, свидетельствующая о высокой степени пространственной когерентности излучения.

При условии достаточно высокой степени корреляции между соседними импульсами подобная система может быть использована для получения частотной гребенки протяженностью в октаву. Частотную гребенку такой ширины можно использовать в качестве линейки для измерения большого интервала между лазерной частотой и ее второй гармоникой, равного самой лазерной частоте. Удастся получить белый свет с помощью импульсов из лазерного генератора без использования регенеративного усилителя, использование которого значительно снижает частоту повторения импульсов - этого можно достичь с помощью маленького волновода, изготовленного из материала с высокой оптической нелинейностью, который позволил бы получать белый свет ниже пороговой мощности самофокусировки. Будут ли интерферировать эти два импульса белого света?

Используя интерферометр Майкельсона, который помещался в лазерный луч и был слегка разъюстирован, так, чтобы два луча выходили из

интерферометра в двух немного различных направлениях. Регулируя длину одного плеча интерферометра, добивались, чтобы два сфокусированных импульса попадали на пластину CaF_2 строго одновременно, на которой наблюдаются стабильные высококонтрастные интерференционные полосы для всех цветов. Импульсы белого света оказываются синхронизованы по фазе с лазерным полем диодной накачки! Если бы такие импульсы были разделены во времени, а не в пространстве, они бы интерферировали в спектральном представлении, приводя к возникновению очень широкой частотной гребенки.

Лазерный термоядерный синтез

Темп развития цивилизации, а с нынешнего тысячелетия и само ее существование, определяется имеющимися в ее распоряжении энергетическими источниками. При всех достоинствах солнечной, ветровой, геотермальной и других альтернатив традиционным невозобновляемым энергетическим источникам (нефти, газу, урану, углю) единственной реальной является термоядерный синтез.

Рассмотрим физические принципы лазерного термоядерного синтеза - быстро развивающегося научного направления, в основу которого легли два выдающихся открытия XX столетия: термоядерные реакции и лазеры. Термоядерные реакции протекают при слиянии (синтезе) ядер легких элементов. При этом наряду с образованием более тяжелых элементов выделяется избыточная энергия в виде кинетической энергии конечных продуктов реакции и гамма-излучения. Большое энерговыделение при протекании термоядерных реакций и привлекает внимание ученых из-за возможности их практического применения в земных условиях. Так, термоядерные реакции в крупных масштабах осуществлены в водородной (или термоядерной) бомбе. Чрезвычайно привлекательной представляется возможность утилизации энергии, выделившейся при термоядерных реакциях для решения энергетической проблемы. Дело в том, что топливом при таком способе получения энергии является изотоп водорода дейтерий (D), запасы которого в Мировом океане практически неисчерпаемы.

Термоядерная реакция - это процесс слияния (или синтеза) легких ядер в более тяжелые. Так как при этом происходит образование сильно связанных ядер из более рыхлых, процесс сопровождается выделением энергии. Легче всего происходит слияние изотопов водорода - дейтерия D и трития T. Ядро дейтерия - дейтрон содержит один протон и один нейтрон. Дейтерий содержится в воде в соотношении одна часть на 6500 частей водорода. Ядро трития - тритон состоит из протона и двух нейтронов. Тритий нестабилен (период полураспада 12,4 года), однако может быть получен в результате ядерных реакций. При синтезе ядер дейтерия и трития образуются гелий He с атомной массой, равной четырём, и нейтрон n. В результате реакции выделяется энергия 17,6 МэВ. Слияние ядер дейтерия

происходит по двум каналам примерно с одинаковой вероятностью: в первом образуются тритий и протон p и выделяется энергия, равная 4 МэВ; во втором канале - гелий с атомной массой 3 и нейтрон, а выделившаяся энергия 3,25 МэВ. Для процесса слияния ядра дейтерия и трития должны обладать энергией порядка 10 кэВ; энергия продуктов реакции достигает величины порядка единиц и десятков мега электрон-вольт. Следует также отметить, что сечение реакции $D + T$ и скорость ее протекания значительно выше (в сотни раз), чем для реакции $D + D$. Следовательно, для реакции $D + T$ значительно легче достичь условий, когда выделившаяся термоядерная энергия превзойдет затраты на обеспечение процессов слияния.

Возможны и реакции синтеза с участием других ядер элементов (например, лития, бора и т.д.). Однако сечения реакций и скорости их протекания для этих элементов существенно меньше, чем для изотопов водорода, и достигают заметных значений лишь для температур порядка 100 кэВ. Достижение таких температур в термоядерных установках в настоящее время предоставляется совершенно нереальным, поэтому лишь реакции слияния изотопов водорода могут иметь практическое применение в ближайшем будущем.

Проблема практической реализации управляемого термоядерного синтеза заключается в том, что слиянию ядер препятствуют электрические силы отталкивания. Поэтому для синтеза ядер, образования новых элементов и выделения избыточной энергии необходимо преодолеть кулоновский барьер 0,1- 0,5 МэВ, то есть совершить работу против сил отталкивания, сообщая ядрам необходимую энергию. Однако не обязательно сводить ядра вплотную, уже на расстояниях порядка 10^{-13} м, весьма вероятным становится объединение ядер вследствие туннельного эффекта, так называемый подбарьерный или туннельный синтез. Кулоновская энергия при этом составляет лишь 0,01 МэВ.

Существуют две возможности реализации этого условия. Одна из них заключается в столкновении двух ускоренных навстречу друг другу пучков легких атомов. Однако, что этот путь неэффективен. Дело в том, что вероятность слияния ядер в ускоренных пучках чрезвычайно мала из-за низкой плотности ядер и ничтожно малого времени их взаимодействия, хотя создание пучков необходимой энергии в существующих ускорителях проблемы не составляет. Другой путь, который используется в настоящее время, - нагрев вещества до высоких температур (порядка 10^8 К). Чем выше температура, тем выше средняя кинетическая энергия частиц и тем большее их количество может преодолеть кулоновский барьер.

Для того чтобы энергия, выделившаяся в результате реакции, сравнялась с энергетическими затратами на нагрев плазмы до температур порядка 10 кэВ, необходимо выполнение так называемого критерия Лоусона :

$n\tau \approx 10^{14}$ с/см³ для D-T реакции; $n\tau \approx 10^{14}$ с/ см³ для D-D реакции; где n - плотность дейтериево-тритиевой смеси, τ - время удержания.

(эти соотношения были получены также И.Е.Таммом и А.Д.Сахаровым, однако по режимным соображениям не были опубликованы).

К настоящему времени сформировались два в значительной мере независимых подхода к решению проблемы управляемого термоядерного синтеза. Первый из них основан на возможности удержания и термоизоляции высокотемпературной плазмы относительно низкой плотности ($n \approx 10^{14} - 10^{15}$ см⁻³) магнитным полем специальной конфигурации в течение сравнительно длительного времени ($\tau \approx 1-10$ с). К таким системам относится «Токамак (аббревиатура от «тороидальная камера с магнитными катушками»)), предложенный в 50-х годах в СССР. (И.Н.Головин рассказывал, что первоначальное название было «Токамаг», от конечного «магнит», но «магия» не понравилась кому-то наверху и название стало «индейским».)

Другой путь импульсный. При импульсном подходе необходимо быстро нагреть и сжать малые порции вещества до таких температур и плотностей, при которых термоядерные реакции успевают бы эффективно протекать за время существования ничем не удерживаемой или, как говорят, инерциально удерживаемой плазмы. Оценки показывают, что, для того чтобы сжать вещество до плотностей 100-1000 г/см³ и нагреть его до температуры $T \approx 5-10$ кэВ, необходимо создать давление на поверхности сферической мишени $P \approx 5 \cdot 10^9$ атм, то есть нужен источник, который позволял бы подвести к поверхности мишени энергию с плотностью мощности $Q \approx 10^{15}$ Вт/см².

Впервые идея использования мощного лазерного излучения для нагрева плотной плазмы до термоядерных температур была высказана Н.Г. Басовым и О.Н. Крохиным в начале 60-х годов. В последствии из нее сформировалось самостоятельное направление термоядерных исследований - лазерный термоядерный синтез (ЛТС).

Обсудим кратко основные физические принципы, заложенные в концепцию достижения высоких степеней сжатия веществ и получения больших коэффициентов усиления по энергии с помощью лазерных микровзрывов. Рассмотрение построим на примере так называемого режима прямого сжатия. В этом режиме микросфера, наполненная термоядерным топливом, со всех сторон "равномерно" облучается многоканальным лазером. В результате взаимодействия греющего излучения с поверхностью мишени образуется горячая плазма с температурой в несколько кэВ (так называемая плазменная корона), разлетающаяся навстречу лучу лазера с характерными скоростями $10^7 - 10^8$

см/с. Греющее излучение распространяется в глубь мишени лишь до области с плотностью электронов, называемой критической, где частота лазерного излучения сравнивается с плазменной. Значение критической плотности n связано с частотой лазера, например, для неодимового лазера с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм составляет $n = 10^{21}$ см⁻³. В окрестности этой области излучение начинает поглощаться, а непоглощенная часть отражается, также далее поглощаясь плазмой. Основным механизмом поглощения здесь так называемое обратное тормозное поглощение света электронами (электрон поглощает излучение, рассеиваясь в поле иона). Вблизи критической плотности наряду с классическим обратным тормозным механизмом поглощения важную роль играют резонансный и, так называемые, аномальные механизмы, связанные с развитием в плазме параметрических неустойчивостей. Часть из параметрических неустойчивостей ведет к увеличению доли поглощенной энергии, а такие, как вынужденное рассеяние Мандельштам-Бриллюэна и вынужденное комбинационное рассеяние, - к паразитному рассеянию излучения на плазменной короне. Другое явление - рефракция греющего излучения в плазменной короне также может вести к уменьшению поглощения. Дело в том, что показатель преломления увеличивается от нуля в области с критической плотностью до единицы на краю плазмы. В этом случае плазменная корона действует как отрицательная линза для всех лучей, параллельных градиенту плотности, выталкивая их из плотных областей плазмы. К счастью, эффекты вынужденного рассеяния оказались не столь существенны.

Не имея возможности более детально остановиться на процессах поглощения в плазменной короне, отметим, что в современных модельных экспериментах на уровне энергий лазерного излучения 10-100 кДж для мишеней, сравнимых по размерам с мишенями для больших коэффициентов усиления, удается достичь высоких ($\approx 90\%$) коэффициентов поглощения греющего излучения. Световое излучение не может проникнуть в плотные слои мишени, так как плотность твердого тела составляет $\approx 10^{23}$ см⁻³. За счет теплопроводности энергия, поглощенная в плазме с электронной плотностью, меньшей критической, передается в более плотные слои, где происходит абляция вещества мишени. Оставшиеся неиспаренными слои мишени под действием теплового и реактивного давления ускоряются к центру, сжимая и нагревая находящееся в ней топливо. В итоге энергия лазерного излучения превращается на рассматриваемой стадии в кинетическую энергию вещества, летящего к центру, и в энергию разлетающейся короны. Очевидно, что полезная энергия сосредоточена в движении к центру. Эффективность вклада световой энергии в мишень характеризуется отношением указанной энергии к полной энергии излучения - так называемым гидродинамическим коэффициентом полезного действия (КПД). Достижение достаточно высокого гидродинамического КПД (10-20%) является одной из важных

проблем ЛТС.

Какие же процессы могут препятствовать достижению высоких степеней сжатия? Один из них заключается в том, что при термоядерных плотностях излучения $Q > 10^{14}$ Вт/см² заметная доля поглощенной энергии трансформируется не в классическую волну электронной теплопроводности, а в потоки быстрых электронов, энергия которых много больше температуры плазменной короны (так называемые надтепловые электроны). Это может происходить как за счет резонансного поглощения, так и вследствие параметрических эффектов в плазменной короне. При этом длина пробега надтепловых электронов может оказаться сравнимой с размерами мишени, что приведет к предварительному прогреву сжимаемого топлива и невозможности получения предельных сжатий. Большой проникающей способностью обладают и рентгеновские кванты большой энергии (жесткое рентгеновское излучение), сопутствующие надтепловым электронам. Тенденцией экспериментальных исследований последних лет является переход к использованию коротковолнового лазерного излучения ($\lambda < 0,5$ мкм) при умеренных плотностях потока ($Q < 10^{15}$ Вт/см²). Практическая возможность перехода к нагреву плазмы коротковолновым излучением связана с тем, что коэффициенты конверсии излучения твердотельного неодимового лазера (основного кандидата в драйверы для ЛТС) с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм в излучения второй, третьей и четвертой гармоник с помощью нелинейных кристаллов достигает 70-80%. В настоящее время фактически все крупные лазерные установки на неодимовом стекле снабжены системами умножения частоты. Физической причиной преимущества использования коротковолнового излучения для нагрева и сжатия микросфер является то, что с уменьшением длины волны увеличивается поглощение в плазменной короне и возрастают абляционное давление и гидродинамический коэффициент передачи. На несколько порядков уменьшается доля надтепловых электронов, генерируемых в плазменной короне, что является чрезвычайно выгодным для режимов как прямого, так и непрямого сжатия. Для непрямого сжатия принципиально и то, что с уменьшением длины волны увеличивается конверсия поглощенной плазмой энергии в мягкое рентгеновское излучение.

Остановимся теперь на режиме непрямого сжатия. Анализ показывает, что осуществление режима сжатия до высоких плотностей топлива оптимально для простых и сложных оболочечных мишеней с аспектным отношением R / D в несколько десятков. Здесь R - радиус оболочки, D - ее толщина. Однако сильное сжатие может быть ограничено развитием гидродинамических неустойчивостей, которые проявляются в отклонении движения оболочки на стадиях ее ускорения и торможения в центре от сферической симметрии и зависят от отклонений начальной формы мишени от идеально сферической и неоднородного распределения

падающих лазерных лучей по ее поверхности. Развитие неустойчивости при движении оболочки к центру приводит сначала к отклонению движения от сферически-симметричного, затем к турбулизации течения и, в конце концов, к перемешиванию слоев мишени и дейтериево-тритиевого горючего. В результате в конечном состоянии может возникнуть образование, форма которого резко отличается от сферического ядра, а средняя плотность и температура значительно ниже величин, соответствующих одномерному сжатию. При этом начальная структура мишени (например, определенный набор слоев) может быть полностью нарушена. Физическая природа такого типа неустойчивости эквивалентна неустойчивости слоя ртути, находящегося на поверхности воды в поле тяжести. При этом, как известно, происходит полное перемешивание ртути и воды, то есть в конечном состоянии ртуть окажется внизу. Аналогичная ситуация и может происходить при ускоренном движении к центру вещества мишени, имеющей сложную структуру, или в общем случае при наличии градиентов плотности и давления.

Требования к качеству мишеней достаточно жесткие. Так, неоднородность толщины стенки микросферы не должна превышать 1%, однородность распределения поглощения энергии по поверхности мишени 0,5%. Предложение использовать схему непрямого сжатия как раз и связано с возможностью решить проблему устойчивости сжатия мишени. Принципиальная схема эксперимента непрямого сжатия следующая. Излучение лазера заводится в полость, фокусируясь на внутренней поверхности внешней оболочки, состоящей из вещества с большим атомным номером, например золота. Как уже отмечалось, до 80% поглощенной энергии трансформируется в мягкое рентгеновское излучение, которое нагревает и сжимает внутреннюю оболочку. К преимуществам такой схемы относятся возможность достижения более высокой однородности распределения поглощенной энергии по поверхности мишени, упрощение схемы лазера и условий фокусировки и т.д. Однако имеются и недостатки, связанные с потерей энергии на конверсию в рентгеновское излучение и сложностью ввода излучения в полость.

Эксперименты по достижению высоких плотностей сжимаемого топлива в режиме прямого сжатия начались в середине 70-х годов в Физическом институте им. П.Н. Лебедева, где на установке «Кальмар» с энергией $E = 200$ Дж была достигнута плотность сжимаемого дейтерия $n \approx 10$ г/см³. В дальнейшем программы работ по ЛТС активно развивались в США (установки «Шива», «Нова» в Ливерморской национальной лаборатории, «Омега» в Рочестерском университете), Японии («Гекко-12»), России («Дельфин» в ФИАНе, «Искра-4», «Искра-5» в ВНИИЭФ) на уровне энергии лазеров 1-100 кДж. Детально исследовались все аспекты нагрева и сжатия мишеней различной конфигурации в режимах прямого и непрямого

сжатий. Достигаются абляционное давление ~ 100 Мбар и скорости схлопывания микросфер $V > 200$ км/с при значениях гидродинамического КПД порядка 10%. Прогресс в развитии лазерных систем и конструкций мишеней позволил обеспечить степень однородности облучения сжимаемой оболочки 1-2% как при прямом, так и при непрямом сжатии. В обоих режимах были достигнуты плотности сжатого газа 20-40 г/см³, а на установке «Гекко-12» была зарегистрирована плотность сжатой оболочки 600 г/см³. Максимальный нейтронный выход составил $N = 10^{14}$ нейтронов за вспышку.

Таким образом, вся совокупность полученных экспериментальных результатов и их анализ указывают на практическую реализуемость следующего этапа в развитии лазерного термоядерного синтеза - достижение плотностей дейтериево-тритиевого газа 200-300 г/см³, осуществление сжатия мишени и достижение заметных коэффициентов усиления k на уровне энергии $E = 1$ МДж. В настоящее время за рубежом интенсивно разрабатывается элементная база и создаются проекты лазерных установок мегаджоульного уровня. В Ливерморской лаборатории начато создание установки на неодимовом стекле с энергией $E = 1,8$ МДж. Стоимость проекта составляет 2 млрд долларов. Создание установки аналогичного уровня запланировано и во Франции. На этой установке планируется достижение коэффициента усиления по энергии ~ 100 . Нужно сказать, что запуск установок такого масштаба не только приблизит возможность создания термоядерного реактора на основе лазерного термоядерного синтеза, но и предоставит в распоряжение исследователей уникальный физический объект - микровзрыв с энерговыделением 10^7 - 10^9 Дж, мощный источник нейтронного, нейтринного, рентгеновского и γ -излучений. Это будет иметь не только большое физическое значение (возможность исследовать вещества в экстремальных состояниях, физики горения, уравнения состояния, лазерных эффектов и т.д.), но и позволит решить специальные задачи прикладного, в том числе военного, характера.

Для реактора на основе лазерного термоядерного синтеза необходимо, однако, создание лазера мегаджоульного уровня, работающего с частотой повторения в несколько герц. В ряде лабораторий исследуются возможности создания таких систем на основе новых кристаллов. Запуск опытного реактора по американской программе планируется на 2025 год.

*С 1988 года и до конца жизни отделом лазерного термоядерного синтеза Отделения квантовой радиофизики Физического института им П.Н. Лебедева заведовал академик **Лев Петрович Феокистов** (1928-2002), выдающийся ученый, один из создателей термоядерного оружия, Герой Социалистического труда, лауреат Ленинской и Государственной премий. Здесь Лев Петрович совместно с Н.Г. Басовым продолжил исследования различных вариантов ядерных и термоядерных реакторов, начатые им ещё во время работы во ВНИИТФ. Благодаря этим*

исследованиям появилась концепция гибридного реактора, в котором подкритический реактор подсвечивается термоядерными нейтронами, получаемыми в результате лазерного синтеза. В частности, Л.П. Феокистовым был предложен двухкаскадный вариант реактора, сочетающий в себе быстрый маломощный реактор-усилитель с энергетическим тепловым, в котором можно ожидать коэффициента усиления термоядерной энергии до 5000 раз

Вспоминает главный научный сотрудник ФИАН Сергей Гуськов: «Отдел Лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) был создан в 1990 году по решению Николая Геннадьевича Басова специально для Льва Петровича, который стал первым руководителем этого отдела. К моменту образования отдела в Отделении квантовой радиофизики уже в течение длительного времени (с середины 60-х годов) велись работы в области взаимодействия лазерного излучения с веществом и ЛТС. Вообще, ФИАН — пионер в области ЛТС. Принцип инерциального термоядерного синтеза — надо сжать вещество, нагреть и, если за время сжатия оно не разлетелось и произойдут реакции, то будет термоядерный выход и возможность управления реакцией только за счёт сил инерции. Вероятность термоядерного выхода определяется той плотностью, до которого сжали вещество, и той температурой, до которой его нагрели. Чем больше сжать вещество, тем больше скорость реакции. У лазера должен быть специально подобран импульс. Мишень должна быть определённой конструкции.

Лев Петрович очень много занимался именно мишенной частью. Идеи эти были выдвинуты Н.Г. Басовым и О.Н. Крохиным в 1961 году в докладе на заседании президиума Академии наук. Тогда и было предложено новое направление, новый способ создания и удержания термоядерной плазмы. После этого началась напряжённая работа, и в 1968 году были получены первые термоядерные нейтроны. Демонстрация проводилась ещё без сжатия, только нагрев, но уже зарегистрировали нейтроны. Создан ряд лазеров, каждый из которых в своё время считался самым крупным в мире. Например, лазер «Кальмар» (100 Дж). Это была выдающаяся установка, единственная в мире, которая позволила облучать сферическую мишень сразу с девяти направлений. Взаимодействие ФИАНа по этим работам было с Феокистовым, когда он ещё работал в Челябинске-70, во ВНИИТФ. Помимо специальных задач, которые поглощали большую часть его времени, Лев Петрович всегда интересовался физикой ЛТС. Ряд процессов, которые протекают при взрыве бомбы (сжатие вещества, нагрев плазмы, удержание конструкции, инициирование реакции), могут проверяться при аналогичных условиях в экспериментах с лазерной мишенью в лабораторных условиях, а не на полигоне. Это, конечно, не тот диапазон температур и плотностей, которые имеют место в бомбе, но взаимосвязь процессов тесная.

Лев Петрович был председателем межведомственной комиссии, которую создали по предложению Басова для координации работ в области ЛТС между различными ведомствами, включая Академию наук и Министерство среднего машиностроения. Это было мудрое решение, потому что ФИАН, в котором велись работы по ЛТС, в силу статуса академического института не в состоянии был строить очень большие установки, это даже финансированием не предусматривалось. Центры Минсредмаша, такие как Арзамас-16 (ныне Саров), Челябинск-70 (ныне Снежинск), имели большой технический потенциал для проведения крупных исследований и могли оказать помощь в развитии новых направлений. По всей видимости, Басов и Феокистов именно тут искали возможности создания контактов, научной и, конечно, финансовой поддержки ФИАНа со стороны того же ВНИИТФ. Эта комиссия работала с конца 70-х до середины 80-х и состояла из представителей АН, ТРИНИТИ (Троицк), который был тогда филиалом Курчатовского института, самого Курчатовского института, ВНИИЭФ (Арзамас-16) и ВНИИТФ (Челябинск-70). Всего в комиссии было человек двенадцать.

Работать с Феокистовым было исключительно интересно. То, что он был начальником, никогда не ощущалось. Я понимал, что он выдающийся физик. Он никогда ничего не приказывал, всегда было какое-то обсуждение, он умел слушать. Если говорить о моей с ним работе, у меня было много интересных задач. Я бы рассказал о двух направлениях, которые ярко характеризуют Феокистова как выдающуюся личность и как талантливейшего учёного. В сложной экономической ситуации начала 90-х годов Л.П. подстёгивал нас не как начальник, а как физик. Он всё время говорил: «Нужны серьёзные задачи!» Тут на науку вообще денег не отпускают, а он говорит: «Нужно сформулировать задачу». Дадут, не дадут денег — не важно, всё равно надо ставить серьёзные научные задачи. Ему всегда нужна была физика. Он всегда добивался своего. Например, он хотел, чтобы в лаборатории был свой действующий лазер. Будучи теоретиком, он физики без эксперимента не представлял. С большим трудом, но лазер был создан. Вернее, реконструирован из старого железа. Трудностей было дикое количество: нет приборов, нет на них денег. Тем не менее деньги где-то доставались, Феокистов договаривался в Минатоме, дело продвигалось. Но ещё до того, как этот лазер был создан, он говорил: «Нужно придумать задачи под этот лазер».

Лев Петрович инициировал работы по нескольким очень важным задачам и сам принимал в них участие. В 93-м он высказывает идею, которая родилась из его «бомбовой» практики, — «термоядерные системы с бесконечным усилением энергии». Представьте, что вы взорвали одну бомбу, не важно, с помощью какого источника. Вторая, побольше, помещённая рядом, взрывается за счёт передачи ей энергии

взрыва первой бомбы, содержащейся главным образом в излучении. Дальше расположена ещё большая бомба. Можно ли увеличить коэффициент усиления — то есть отношение энергии, которую вы освободили, к энергии, которую вы подвели? Можно ли выйти на бесконечность? Львом Петровичем было получено строгое математическое подтверждение, что можно выйти на бесконечный коэффициент усиления по энергии. Но это дискретная система. А можно ли придумать непрерывную систему с бесконечным усилением термоядерной энергии? Оказывается, можно. Такая система представляет собой две коаксиальные цилиндрические оболочки. Внутри центрального цилиндра распространяется волна термоядерного горения. При этом система устроена так, что часть выделяющейся термоядерной энергии преобразуется в энергию мягкого рентгеновского излучения. Это излучение распространяется в промежутке между цилиндрами, обгоняя волну термоядерного горения, и сжимает термоядерное горючее непосредственно перед фронтом волны горения, тем самым улучшая условия распространения и эффективность волны горения. Мы со Львом Петровичем получили изящное аналитическое решение этой достаточно сложной многопараметрической задачи на основе автомодельного подхода. Потом это решение было опубликовано в Письмах в ЖЭТФ, а сама работа доставила мне большое удовольствие.

Вторая задача — это так называемая концепция «прямого зажигания» в инерциальном термоядерном синтезе. Представьте, что у вас есть тонкая сферическая оболочка, в середине которой — ДТ (смесь дейтерия и трития). Если вещество в виде ДТ-льда, то надо предусмотреть криогенную установку, чтобы мишень была при температуре нескольких десятков градусов Кельвина. Лазером мы сжимаем оболочку и заключённое внутри неё ДТ-вещество. Но одновременно вещество греется под воздействием ударной волны, что препятствует сжатию. Возникает задача: можно ли так сжать вещество, чтобы его не греть? Оказалось, есть такое решение — нужно временное профилирование давления. Давление не должно быть сразу большим. Такое решение задачи было получено независимо нами и американцами в Ливерморской лаборатории. Но воплотить это решение на практике оказалось сложно. Очень трудно задать давление. Во-первых, это очень дорого. К тому же система неустойчива. Мы предложили эти процессы сжатия и нагрева разделить радикальным способом: сначала сжимать, а потом уже сжатое вещество нагреть, при этом применить два разных источника энергии. Первый лазер медленно сжимает мишень по так называемой холодной адиабате. На это тратится основная энергия. После этого в момент максимального сжатия нужно воздействовать на мишень вторым, очень мощным лазерным импульсом (с интенсивностью 10^{18-19} Вт/см²) с очень короткой длительностью (несколько десятков пикосекунд) — для того чтобы нагреть термоядерное

топливо до термоядерных температур за время, пока оно не разлетелось. Ещё одна особенность подхода заключается в том, что нагревать надо не всё топливо, а только сотую часть его массы. В этой области происходит инициирование волны термоядерного горения, которая затем распространяется на всё окружающее сжатое топливо. Однако имеется серьёзная проблема. В момент максимального сжатия остаётся часть оболочки, сжимавшей топливо. Оболочка должна оставаться, и она должна быть тяжелее ДТ. Пусть 80 процентов её испарилось, но оставшиеся 20 процентов должны держать ДТ. Возникает задача: как пробиться вторым лазером к термоядерному веществу? Тогда родилась идея сделать симметричные дырки в самой первоначальной конструкции оболочки. Но плазма разлетается во все стороны, и эти окошки будут „затекать“. Нашли и тут выход — сделать покрытия окошечек совсем из специального материала, отличного от материала оболочки. Мы назвали такую мишень «мишенью прямого зажигания» и опубликовали с Феохтистовым в 1992 году статью, а доложили на конференции ещё в 91-м году. Эта конференция была посвящена вопросам взаимодействия излучения с веществом и ЛТС и проходила в Варшаве (Польша). Кроме наших там были коллеги из Франции и США. Доклад получил статус „приглашённого“ пленарного доклада, я его делал. Лев Петрович был тоже на конференции. А в 94-м году американцы опубликовали свою работу в журнале «Физика плазмы», где без всяких ссылок на наши достижения изложили точно такой же подход к проблеме — разделение стадий сжатия и нагрева. Правда, ничего не говорилось об окнах. У них вместо этого прозвучала идея пробивания отверстий во время самого процесса нагрева. Лазерный импульс разделяется на две части. Один пробивает дырочку, а другой входит в неё. Они назвали эту идею «быстрое зажигание» (fast ignition) в отличие от нашего прямого зажигания (direct ignition). Сейчас подход прямого зажигания, как в редакции с мишенью, имеющей дырки, так и в редакции пробивания дырки в процессе нагрева, исследуется во всех крупнейших лабораториях мира. Это направление является самым перспективным в проблеме инерциального термоядерного синтеза, так как требует значительно меньших энергетических затрат, чем традиционные подходы. Энергия падает с ИМДж до 200 кДж.

Работа со Львом Петровичем над этими и другими проблемами приносила удовлетворение и большое удовольствие — настолько это была богатая личность, щедрая на идеи. Интеллигентнейший человек! Способ мышления очень интересный — самый сложный процесс он умел объяснить просто. Лев Петрович говорил, что этому подходу он научился у Якова Борисовича Зельдовича и Давида Альбертовича Франк-Каменецкого. Мыслить интересно и излагать просто. Он выделял главное в процессе и те параметры, с помощью которых можно это главное объяснить. Ему тоже было нужно любую проблему объяснить так, чтобы он понял. Часто он останавливал собеседника и говорил: «Что-то не так, это непонятно».

Но это всегда говорилось интеллигентно — он просто предлагал подумать ещё. Саму идею он, конечно, ухватывал мгновенно. Когда он выступал с докладом, это был целый спектакль. Он говорил очень красиво, был исключительно обаятельным. От него трудно было услышать резкое слово даже в полемике» [45,48].

Военное применение лазеров

Широко (к сожалению) лазеры используются в военном деле. По словам директора военных исследовательских программ фирмы «Боинг»: «высокоэнергетические лазеры являются оружием будущего и всегда останутся таковыми... Но для тактических лазеров оно уже наступило». В США еще в 2002 году ожидалась постройка на вооружение лазерных пушек, прототипом которых является FEL – лазер на свободных электронах; созданный в лаборатории имени Т.Джефферсона (Вирджиния) образец имеет мощность 100 кВт и к 2012 году произошло ожидаемое повышение мощности до нескольких МВт. ИК передовой химический лазер MIRACL устанавливается на «Боинг 747-400». Его модификация MTHEL, установленная на автомобильном трейлере, на полигоне позволила уничтожить в полете сразу несколько снарядов. В сентябре 1985 года водород-фторный лазер MIRACL мощностью 2,2 МВт за 12 секунд прожег отверстие в корпусе бака ракеты «Титан-1». На полигоне Белые пески (Нью-Мексико) испытан армейский лазер «Зевс», смонтированный на вездеходе «Хаммер», мощностью 100 кВт и дальностью действия до 8 км (полупроводниковый лазер разработан в Ливерморской лаборатории имени Лоуренса).

Основной проблемой мощного лазерного оружия является его высокое энергопотребление. Так для одного выстрела по ракете водород-фторному лазеру требуется до 500 кг химического топлива. Разрабатываемые в программе СОИ эксимерные лазеры наземного базирования с наведением на цель с помощью орбитальных зеркал диаметром 5 метров требуют для своей накачки до 300 ГВт в течение нескольких минут, что составляет примерно 60% мощности от всей энергосистемы США. Поэтому стоимость лазерной части СОИ оценивается примерно в 100 миллиардов долларов. Определенные перспективы в этом плане связывают с разработкой лазеров на свободных электронах, использующих синхротронный эффект при прохождении пучка электронов через вигглер (магнитную гребенку), КПД которых может достигнуть 20 % при длине волны излучения 0,5 – 0,6 мкм. С декабря 2000 года идет комплексная проверка системы НПРО на базе водород-фторного лазера «Альфа-ХЕЛ», которые являются частью программы SBL-IFX (Space Based Lasers Integrated Flight Experiments) с началом эксплуатации в 2020 году.

Что касается отечественных разработок в этой области, то можно упомянуть проект «Терра» (1983-87 годы) по установке газодинамического лазера массой около 60 тонн на самолет Ил-76 МД («А-60»); создание в 1985

году корабельной лазерной системы ПВО «Айдар», способной прожечь обшивку самолета на высоте 400 метров; и, наконец, лазерное русское чудо – газодинамический CO_2 -лазер мощностью 1 МВт, разработанный в ТРИНИТИ, НПО «Алмаз» и НИИ электрофизической аппаратуры имени Д.В.Ефремова; на основе этой разработки создан мобильный (на двух прицепах) комплекс МЛТК-50 мощностью 2 кВт.

Определенный интерес представляет история создания мощных лазеров для программ противоракетной обороны. В начале 60-х годов прошлого века, когда идея лазера - генератора мощного когерентного остронаправленного светового луча - стала обрастать в физических лабораториях «железом» технических решений, появились реальные возможности создания оптических квантовых генераторов с большой мощностью и энергией излучения (в те годы в у нас еще не был принят заимствованный из английского языка термин «лазер»). основополагающие труды по квантовой электронике и мазерам Чарльза Таунса, Александра Прохорова и Николая Басова были удостоены Нобелевской премии в 1964 году. С начала 60-х годов на специалистов обрушилась лавина сообщений по лазерной тематике: в каждом номере ведущих физических и инженерных журналов публиковались новые идеи, схемы и конструкции лазеров, предложения, расчеты, результаты экспериментов. Главным научным центром нашей страны, где выполнялись пионерские работы по квантовым генераторам и, в частности, по лазерам стал Физический институт имени П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН). Ученые ФИАНа, в первую очередь группы, которыми руководили А.М. Прохоров и Н.Г.Басов, в начале 60-х годов сосредоточили свои усилия на увеличении энергии и мощности лазерного излучения, а также на поиске новых типов лазеров. В институте царил атмосфера оптимизма и уверенности в возможности достижения высоких энергетических характеристик лазеров. Достаточно быстро (в течение всего нескольких! лет) исследователями были получены выдающиеся результаты по совершенствованию лазеров и повышению мощности их излучения, открывшие перспективы создания оружия на их основе, названного вскоре «лазерным оружием». В ряде развитых стран мира, в первую очередь в США и СССР, началась гонка, финиш которой, как надеялись, принесет победителю обладание оружием большой силы и дальности действия, позволяющим почти мгновенно поражать удаленную цель.

Проблемой особой важности в США и в СССР была (впрочем, и сейчас остается) противоракетная оборона (ПРО). Атмосфера, в которой зарождался проект использования лазеров в системе ПРО, определялась тем, что в 60-е годы и в СССР и в США создание систем ПРО рассматривалось как национальная стратегическая задача. В 1963 году заместитель министра обороны СССР (впоследствии министр обороны) А.А.Гречко обратился к президенту АН СССР М.В.Келдышу с просьбой оценить возможность военных применений лазеров. Тот, в свою очередь, запросил мнения ведущих физиков-лазерщиков из ФИАНа, в том числе Н.Г.Басова. В ответе АН СССР

подчеркивался большой потенциал лазеров как для научных, так и для оборонных применений и предлагались новые направления работ по увеличению энергетики существовавших в то время лазеров и созданию лазеров новых типов.

Специалисты в области ПРО из ОКБ «Вымпел», главным конструктором и идейным руководителем которого в те годы был Г.В.Кисунько, уже осознали и оценили необходимость решения ряда коренных научно-технических проблем, связанных с возможностью создания и характеристиками систем ПРО. Среди этих проблем первостепенное значение имело точное определение координат головных частей баллистических ракет для наведения на них с минимальным промахом противоракет, в которых вместо ядерных зарядов используются осколочные средства поражения. Отказ от ядерных зарядов в противоракетах облегчал условия работы системы ПРО, т. к. устранялись трудности, связанные с последствиями ядерного взрыва боевой части противоракеты для собственных радиолокаторов, не говоря уже о возможном воздействии таких взрывов над собственной территорией на наземные объекты и население. Фактором, вызвавшим интерес специалистов по ПРО к высокоэнергетическим лазерам, была скорость доставки лазерной энергии к цели, примерно в сто тысяч раз превышавшая скорость полета противоракеты. Это позволяло экономить драгоценные секунды, которых так не хватало разработчикам систем на этапе «ближнего» перехвата, когда, с одной стороны, в атмосфере уже сгорают ложные цели и головную часть баллистической ракеты легче обнаружить, а с другой - остаются считанные секунды до ее «прибытия».

Еще в 1962 году специалистами ОКБ «Вымпел», головной организации СССР по созданию системы ПРО, при непосредственном участии Н. Г. Басова и его ближайшего сотрудника О.Н.Крохина, начала изучаться возможность поражения головной части баллистической ракеты лазерным лучом. Оценки показывали, что для этого потребуется создать лазеры с предельно высокой энергией излучения (на много порядков больше, чем в лазерном локаторе), поскольку головная часть баллистической ракеты - прочное устройство, рассчитанное на большие механические и тепловые нагрузки. Для решения задач в интересах ПРО были нужны лазеры с энергией в импульсе, превышающей достигнутой в 1962 - 1964 годах энергию для лазерной локации в сотни раз, а для поражения головной части баллистической ракеты - в десятки миллионов раз. Какая же именно энергия лазерного луча необходима для поражения головной части баллистической ракеты, было неясно. С самого начала в коллективе Н.Г.Басова понимали, что шансов на поражение головной части баллистической ракеты тепловыми эффектами, вызываемыми нагревом лазерным излучением, мало. О.Н.Крохин предложил использовать для этой цели механический импульс отдачи, возникающий при быстром испарении внешнего слоя теплозащитной оболочки головной части баллистической ракеты под воздействием лазерного излучения высокой интенсивности. Этот механизм требовал

тщательного теоретического и экспериментального изучения, однако сама принципиальная возможность такого способа поражения в те годы не вызывала сомнений. В 1964-1965 годах удалось убедить военно-промышленное руководство страны, в первую очередь Д.Ф.Устинова, а также ряд других государственных и военных руководителей в том, что эту проблему, в принципе, можно решить. Надо сказать, что Д.Ф.Устинов, будучи по образованию инженером, глубоко понимал решающую роль науки в развитии военной техники, был доступен для крупных ученых и конструкторов и с интересом поддерживал новые проекты, обещающие прогресс в военной технике. Авторитет его в вопросах оборонной техники, науки и промышленности был колоссальным, а мнение - почти всегда решающим.

В 1962 году в СССР была утверждена первая государственная программа исследований по известным в то время направлениям лазерной науки и техники. Она не была непосредственно привязана к возможным военным применениям лазеров и предусматривала создание лазеров различных типов (на кристаллах, стеклах, газах, полупроводниках). Предусматривались и работы по таким лазерам, которые при внимательном рассмотрении оказались впоследствии несостоятельными, например по лазерам на водороде (имелось в виду создание лазера на переходах орто- и параводорода). Наряду с ведущим институтом АН СССР ФИАНом, возглавлявшимся в те годы Д.В.Скобельцыным, где лазерной тематикой руководили А.М.Прохоров и Н.Г.Басов, к выполнению работ по лазерам подключились коллективы многих других научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро и высших учебных заведений. В первую очередь надо назвать Государственный оптический институт (ГОИ) им. С.И.Вавилова в Ленинграде (отделы М.П.Ванюкова, А.М.Бонч-Бруевича), оборонный Научно-исследовательский институт прикладной физики (научный руководитель Л.Н.Курбатов) в Москве, Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова (МГУ, физический факультет, Р.В.Хохлов и С.А.Ахманов), научно-исследовательские институты атомной и электронной промышленности. Число научных и промышленных организаций, а также высших учебных заведений, занявшихся исследованиями и созданием лазеров, нарастало лавинообразно и уже к середине 60-х годов, вероятно, достигало в СССР сотни. Как и в других областях новой техники и технологии, военные проявляли значительный интерес к оборонным применениям лазеров, поддерживая и финансируя значительную часть работ ученых за счет оборонных статей бюджета.

Одним из первых вариантов такого применения явилось создание **лазерного локатора ЛЭ-1**. Для лазерной локации особый интерес представлял новый в те годы режим гигантского импульса (позже названный режимом модуляции добротности) для генерации коротких и очень мощных импульсов лазерного излучения, впервые предложенный в США и во Франции. Создание лазеров с модулированной добротностью, излучавших импульсы наносекундной длительности, позволило приступить к оценке

возможности их использования в импульсных высокоточных лазерных локахторах для ПРО. Группа молодых инженеров ОКБ «Вымпел» (В.Ф.Морсков, Н.И.Ломакин, Н.П.Куксенко, Ю.П.Шилохвост и др.), впоследствии ставших ядром разработчиков лазерных систем для ПРО, в лазерной лаборатории отдела под руководством Н.Д.Устинова (сын фактического руководителя военно-промышленного комплекса СССР Д.Ф.Устинова) выполняла начальные эксперименты. Он сам не был крупным специалистом, а являлся, скорее, влиятельной фигурой, участие которой объективно способствовало развитию лазерного направления в ОКБ «Вымпел». Основной движущей силой были научные достижения ФИАНа, в частности группы Н.Г.Басова. В результате проведенных в ОКБ «Вымпел» исследований, опиравшихся в отношении самих лазеров на работы и прогнозы группы Н.Г.Басова, в начале 1963 года в Военно-промышленную комиссию (ВПК, орган государственного управления военно-промышленным комплексом СССР) был представлен проект создания экспериментального лазерного локахтора для ПРО, получившем о условное название ЛЭ-1. Первоначально предполагалось построить локахтор на основе рубинового лазера со средней мощностью излучения порядка 1 кВт при импульсной мощности десятки мегаватт в режиме гигантского импульса.

Решение о создании на Балхашском противоракетном полигоне высокоточного экспериментального локахтора ЛЭ-1 для определения координат головных частей баллистических ракет на дальностях до 400 км было утверждено в сентябре 1963 года. Предполагалось достичь высокого пространственного и углового разрешения локахтора - единицы метров и угловых секунд для того, чтобы «разглядеть» отдельные элементы сложной цели, например боеголовки, окруженной фрагментами ракеты и ложными целями, что должно было, по замыслу разработчиков, в известной мере решить проблему селекции настоящей боеголовки на фоне ложных целей.

В 1964-1965 годах проект ЛЭ-1 разрабатывался и конкретизировался специалистами ОКБ «Вымпел» (лаборатория Г.Е.Тихомирова в подразделении, возглавлявшемся О.А.Ушаковым). Работы по оптическим системам локахтора велись в ГОИ в лаборатории П.П.Захарова, где совместно с инженерами ОКБ «Вымпел» создавалась оптическая схема локахтора. Локахтор должен был осуществлять за короткое время поиск целей в «поле ошибок» радиолокахторов, обеспечивавших целеуказание лазерному локахтору, что требовало весьма высоких по тем временам средних мощностей лазерного излучателя. Потребовалось создать высокоточные быстродействующие оптические устройства для формирования, переключения и наведения 192 лазерных лучей, определявших поле поиска в пространстве цели. Локахтор был построен и начал функционировать только в середине 70-х годов.

С организацией ЦКБ «Луч» и переводом лазерной тематики в Министерство оборонной промышленности работы по локахтору ЛЭ-1 ускорились и стали на реальную основу. К его созданию были привлечены дополнительные силы ряда предприятий оптической отрасли. В 1970-1971

годах разработка локатора была завершена. Силами ЛОМО и ленинградского завода «Большевик» (где директором в предвоенные годы недолго был Д.Ф.Устинов) создавался уникальный по комплексу параметров телескоп ТГ-1 для ЛЭ-1. Этот телескоп с диаметром главного зеркала 1.3 м обеспечивал высокое оптическое качество лазерного луча при работе со скоростями и ускорениями в сотни раз более высокими, чем у классических астрономических телескопов. Были созданы многие новые узлы локатора: быстродействующие точные сканирующие и переключающие системы для управления лазерным лучом, фотоприемники, электронные блоки обработки сигналов и синхронизации и другие устройства. Разработанный ЦКБ «Геофизика» лазерный передатчик, включал 192 весьма совершенных по тому времени лазеров, систему их охлаждения и электропитания. Для ЛЭ-1 было организовано производство высококачественных лазерных кристаллов рубина, нелинейных кристаллов КБР и многих других элементов.

В 1974 году наладочные работы на локаторе были завершены и начались его поэтапные испытания при участии военных специалистов полигона и инженеров всех предприятий-разработчиков. Испытания позволили получить надежные экспериментальные данные по всем важнейшим параметрам ЛЭ-1 и в целом подтвердили работоспособность и достижение большинства заданных характеристик. В 1980 году постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР локатор ЛЭ-1 по результатам испытаний был принят как средство для точных траекторных измерений на Балхашском полигоне. С помощью ЛЭ-1 впоследствии велись локационные траекторные измерения орбит ряда советских и зарубежных спутников и космических кораблей. При этом предпринимались меры предосторожности, чтобы сигналы (хотя и относительно небольшой мощности) лазерного локатора не нанесли какого-либо ущерба функционированию чувствительной аппаратуры, размещенной на космических аппаратах. Вопреки утверждениям, встречавшимся в иностранной печати, работы локатора по пилотируемым космическим аппаратам и станциям, как по советским; так и по американским, были весьма ограничены и фактически запрещены.

Сейчас ЛЭ-1, к сожалению, «ржавеет» в казахстанской каменистой степи, многие его части разломаны и разбиты, устарели физически и морально. Предпринимались попытки совместно с казахстанскими учеными «оживить» локатор, но эта весьма дорогостоящая работа не получила развития, ведь ЛЭ-1 теперь находится в другом государстве - суверенном Казахстане.

Поскольку основной задачей ОКБ «Вымпел» было создание комплексов и систем оружия ПРО, то особый интерес вызвало высказанное в конце 1964 г. весьма оптимистичное предложение Н.Г.Басова и О.Н.Крохина, поддержанное затем и рядом других ученых, о принципиальной возможности прямого поражения (разрушения или повреждения оболочки) головной части баллистической ракеты мощным лазерным излучением. У О.Н.Крохина родилась идея использования для накачки лазеров самого мощного

источника света: излучения, возникающего при взрыве атомного заряда в воздухе. Такой экзотический источник по мощности и энергии излучения превосходил другие источники на много порядков. В 1964 года американские ученые опубликовали сообщение о получении на лабораторном фотодиссоционном лазере излучения с небольшими мощностью и энергией. Несколько позже, в 1966 году, в США импульсная энергия излучения такого лазера была доведена до 100 Дж. Н.Г.Басов и О.Н. Крохин предложили применить именно этот тип лазера для достижения предельно высоких энергетических характеристик при его оптической накачке излучением высокотемпературных взрывных источников (американцы не использовали такие источники). Создание очень мощных неламповых источников света с требуемым спектром для накачки (фотодиссоциации) молекул рабочего вещества лазера было одной из основных проблем разработки фотодиссоционных лазеров.

Особенность среды для фотодиссоционных лазеров состоит в наличии интенсивной полосы поглощения оптического излучения накачки в УФ области. Такое излучение эффективно генерируется газовой плазмой при температурах порядка 25000 К. Хотя рассматривалась также и идея использовать для этой цели световое излучение ядерного взрыва в воздухе, наиболее существенной для практической реализации мощных фотодиссоционных лазеров оказалась оригинальная идея ученых из ФИАНа и Всесоюзного научно-исследовательского института экспериментальной физики (ВНИИЭФ в Сарове, известный также как Арзамас-16, ныне - Российский федеральный ядерный центр). Н.Г.Басовым и О.Н.Крохиным было предложено использовать для накачки фотодиссоционных лазеров мощное световое излучение ударной волны в тяжелом газе, создаваемой взрывом заряда взрывчатого вещества. В 1965 году эти ученые предложили отказаться от кварцевой стенки, отделяющей тяжелый газ (например, ксенон) взрывного или электрического источника накачки («открытый разряд») от активной среды фотодиссоционного лазера. Именно использование для накачки фотодиссоционного лазера энергии взрыва химических взрывчатых веществ в виде излучения фронта ударной волны позволило в течение 4-5 лет увеличить энергию и мощность излучения фотодиссоционного лазера в миллионы раз и получить к 1970 году такую энергию излучения, которая и сейчас еще недоступна большинству других лазеров.

В 1965-1966 годах в ходе работ, проведенных сотрудниками ФИАН, ВНИИЭФ и ОКБ «Вымпел» (В.П. Аржанов, Б.Л.Борович, В.С.Зуев, В.М.Казанский, В.А.Катулин, Г.А.Кириллов, С.Б.Кормер, Ю.В.Куратов, А.И.Куряпин, О.Ю.Носач, М.В.Синицын, Ю.Ю.Стойлов и др.) была продемонстрирована возможность получения с помощью взрывных йодных фотодиссоционных лазеров мощных импульсов лазерного излучения на длине волны 1.315 мкм. Уже в первых сериях экспериментов были достигнуты значительные по тем временам импульсная мощность и энергия излучения. В качестве главных компонентов рабочей среды лазера были выбраны соединения углерода, фтора и иода (трифторидметан CF_3I или

гексафториодпропан C_3F_7I). Создание фотодиссоционных лазеров с накачкой УФ излучением фронта ударной волны потребовало и преодоления определенного стереотипа мышления: многим казалась дикой сама идея «взрывающегося» лазера.

В 1965 году Н.Г.Басов и О.Н.Крохин предложили применить такие лазеры для поражения головных частей баллистических ракет реактивным механическим импульсом, возникающим при быстром испарении поверхности головной части под действием мощного лазерного излучения. Н.Г.Басов сообщил об этой идее директору ФИАНа Д.В.Скобельцыну и тогдашнему президенту АН СССР М.В.Келдышу, который привлек к рассмотрению данного предложения академиков Ю.Б. Харитона, Я.Б.Зельдовича, А.Н.Щукина, А.Д.Сахарова, А.Н.Тихонова, А.М.Прохорова, А.А.Самарского и генерального конструктора систем ПРО Г.В.Кисунько. В 1963 и 1965 годах состоялись совещания у М.В.Келдыша, на которых О.Н.Крохин докладывал о предложениях по применению мощных лазеров для решения стратегических оборонных задач. При этом в 1963 году было доложено об использовании для накачки лазеров излучения фронта ударной волны при ядерном взрыве, а в 1965 году сделано предложение о создании сверхмощных фотодиссоционных лазеров, накачиваемых излучением ударной волны при взрыве химического взрывчатого вещества и другими мощными источниками УФ излучения, в частности электрическими разрядами.

Осенью 1965 года Н.Г.Басовым, научным руководителем ВНИИЭФ Ю.Б.Харитоновым, заместителем директора ГОИ по научной работе Е.Н.Царевским и главным конструктором ОКБ «Вымпел» Г.В.Кисунько была направлена записка в ЦК КПСС, в которой говорилось о принципиальной возможности поражения головной части баллистической ракеты лазерным излучением и предлагалось развернуть соответствующую экспериментальную программу. Предложение было одобрено и программа работ по созданию лазерной стрельбовой установки для задач ПРО, подготовленная совместно ОКБ «Вымпел», ФИАН и ВНИИЭФ, была утверждена решением правительства в 1966 году. Предусматривалась разработка высокоэнергетических фотодиссоционных лазеров с энергией более 1 МДж и создание на их основе на Балхашском полигоне научно-экспериментального стрельбового лазерного комплекса (НЭК), на котором идеи лазерной системы для ПРО должны были быть проведены в натуральных условиях. Программа получила шифр «Терра-3».

В результате активной работы экспериментаторов и теоретиков уже в 1966-1967 годах стало ясно, что на выбранном пути могут быть достигнуты такие значения импульсной энергии лазера (называлась цифра до 10 МДж в 1 импульсе, что энергетически соответствует 2 кг мощного взрывчатого вещества), которые в те годы представлялись почти фантастическими. Ученые полагали, что при этих высоких энергиях и мощностях лазерного излучения удастся разрушить теплозащитное покрытие головной части баллистической ракеты. Первые эксперименты с фотодиссоционными

лазерами, проведенные в 1965-67 годах, дали весьма обнадеживающие результаты и к концу 1969 года во ВНИИЭФ с участием ученых ФИАН и ГОИ были разработаны, собраны и испытаны фотодиссоционные лазеры с энергией импульса излучения сотни тысяч джоулей, что было примерно в 100 раз выше, чем у любого известного те годы лазера. Были спроектированы и испытаны лазеры с диаметром рабочей полости более метра и длиной десятки метров. Эти лазеры собирались из стандартных секций длиной около 3 м. Создание этих фотодиссоционных лазеров позволило начать эксперименты по изучению воздействия лазерного излучения высокой интенсивности на материалы и конструкции целей. С развитием работ по взрывным фотодиссоционным лазерам возникла и другая проблема: многим представлялась несуразной идея лазера, способного генерировать только один импульс и непременно самоуничтожаемого (по крайней мере, частично) в ходе работы. *(Заметим, что широкое применение ракетной техники почти полностью основано на использовании ракет, практически уничтожаемых в ходе единственного удачного или неудачного запуска. Другим примером, является получение фотохронограмм взрывов в КБ-11 осенью 1947 года, в которых осколками оболочки заряда, залетающими в амбразуру, разбивался входной объектив. Когда оптики стало не хватать – ее просто не успевали делать, руководитель работ В.А.Цукерман придумал делать снимки с помощью плоского зеркала, которое хотя и гибло при каждом эксперименте, но было проще в изготовлении, нежели объектив. Чтобы не прерывать эксперименты, первые зеркала конфисковали из парикмахерских Кремлева, а В.А.Цукермана прекратили в них обслуживать.[15])* Тем не менее, схема взрывающегося лазера была весьма непривычна и подвергалась критике, в частности из-за высокой стоимости первых образцов фотодиссоционных лазеров и оптики к ним, которые разрушались при каждом эксперименте.

Пока физики и инженеры работали над совершенствованием лазеров, в ОКБ «Вымпел» под руководством О.А.Ушакова в 1967-1969 годах разрабатывался (конечно, с участием ученых) эскизный проект НЭЖ «Терра-3». Непосредственным руководителем разработки проекта был военный инженер Н.Н.Шахонский (впоследствии генерал-майор), прикомандированный Министерством обороны к ОКБ «Вымпел», а затем многие годы работавший в ЦКБ «Луч» (в настоящее время ФНЦ «НПО "Астрофизика"»). Проект создавался в условиях, когда далеко не полностью были ясны возможности создания лазеров, отсутствовали данные по уязвимости головных частей баллистических ракет, стойкости оптики к лазерному излучению, не ясны были и возможности прохождения лазерных пучков с высокими мощностью и энергией через атмосферу. Возникало множество вопросов, в первую очередь о том, как сформировать остронаправленный луч лазерного излучения, как его быстро и точно (ведь требовалось прямое попадание) навести на летящую со скоростью 3-4 км/с головную часть баллистической ракеты. При реализации первого варианта проекта НЭЖ «Терра-3» в ОКБ «Вымпел» планировались, как выяснилось,

нереально высокие значения стойкости оптики к лазерному излучению. С появлением более мощных лазеров в экспериментах, проводимых во ВНИИЭФ, обнаружилось, что оптика (оптическое стекло и оптические покрытия) не выдерживает высоких интенсивностей лазерного излучения. Пришлось принимать срочные меры. Широкая программа работ по созданию более устойчивой к мощному излучению оптики выполнялась в ГОИ, где были детально изучены (под руководством А.М.Бонч-Бруевича и Г.Т.Петровского) процессы ее разрушения и факторы, определяющие ее стойкость. Родилось новое направление в оптике - так называемая силовая оптика. Была начата программа создания оптики, выдерживающей интенсивные потоки лазерного излучения.

Разумеется, создание НЭК на Балхашском полигоне было бы невозможно без прямого участия в этой работе военных. Проект активно поддерживал ведавший вопросами ПРО начальник Главного управления Министерства обороны СССР генерал-полковник Г.Ф.Байдуков - национальный герой, участник знаменитого, первого в истории авиации перелета из Москвы в США через Северный полюс.

В 1967 году достигнутые в экспериментах энергии фотодиссоционных йодных лазеров приблизились уже к 1000 Дж в импульсе. При этом хорошо финансировавшаяся, успешная работа по достижению предельно высоких характеристик лазеров, конечно, увлекала многих ученых и администраторов. Сыграл свою роль и высокий авторитет руководителей программы, в первую очередь Н.Г.Басова и Ю.Б. Харитона. Руководство военно-промышленного комплекса (Д.Ф.Устинов, Л.В.Смирнов, С.А.Зверев) и военные, очевидно, верили в реальность задуманного и наращивали финансирование работ. По крайней мере, они, даже если и видели рискованный характер проекта, не шли на его ограничение. Ведь программа ПРО оставалась сверхактуальной, и руководство боялось «упустить» какое-нибудь направление в ней, которое могло бы привести к созданию реальных боевых систем. С другой стороны, постепенно становилось ясным, что программа требует достаточно длительного этапа исследований и крупномасштабных экспериментов, создания многих новых технологий, развития специальной экспериментально-стендовой базы и новых производств, а следовательно, значительного времени.

В 1967-1968 годах Г.В.Кисунько и системным разработчикам ПРО из ОКБ «Вымпел» стало ясно, что лазерное оружие для ПРО - дело не слишком близкого будущего, от них же правительство требовало создания систем ПРО уже в ближайшее время, поэтому их интерес к лазерному проекту стал падать. Однако коллективы разработчиков лазерного направления уже сформировались, масштабы и объемы финансирования этих работ возрастали, в программу были вовлечены ведущие институты, а относительно быстрый и значительный прогресс в создании мощных взрывных йодных фотодиссоционных лазеров в те годы давал определенные основания для оптимизма. Росло и понимание комплексности и сложности проблемы, требовавшей специальной организации работ. В конце 1968 года

возникли предложения о реорганизации работ и выводе их из ОКБ «Вымпел», занятого созданием в первую очередь ракетных систем ПРО.

Для выполнения конструкторских работ по лазерному локатору ЛЭ-1 и было решено создать в Москве на основе коллектива разработчиков лазерных систем из ОКБ «Вымпел» (СКБ-56) новое специализированное конструкторское бюро, получившее название ЦКБ «Луч». Министр оборонной промышленности СССР С.А.Зверев подчеркивал конструкторский характер предстоящих работ этого предприятия, полагая, очевидно, что научные проблемы, стоящие перед ним, в основном уже решены или решаются учеными АН СССР, ВНИИЭФ и ГОИ. (Будущее показало ошибочность этого предположения, и ЦКБ «Луч», впоследствии переименованное в ЦКБ «Астрофизика», во многом стало и научной организацией прикладного характера.)

В течение нескольких месяцев с привлечением научных руководителей программ из ОКБ «Вымпел», ФИАН, ВНИИЭФ, ГОИ, а также представителей Министерства обороны СССР, был подготовлен проект Постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР, предусматривавшего развертывание на Балхашском полигоне научно-экспериментального стрельбового лазерного комплекса, а также ряд организационных мер, включая создание в составе Министерства оборонной промышленности специализированной лазерной конструкторской фирмы - ЦКБ «Луч». Для этого из ОКБ «Вымпел», входившего в состав Министерства радиопромышленности, выделялись подразделение О.А.Ушакова (СКБ-56) и опытный завод. Предусматривались также продолжение в ЦКБ «Луч» работ по созданию лазерного локатора ЛЭ-1 и выполнение разработанных под руководством Н.Г.Басова программ исследований в институтах АН СССР и в промышленности. После «шлифовки» проекта в ВПК он был утвержден осенью 1969 года.

Директором вновь созданного для конструкторской реализации лазерной программы ЦКБ «Луч» был назначен опытный работник оптической отрасли И.В.Птицын, который на предыдущих должностях показал способность обеспечивать быстрое развитие и строительство материально-технической базы своего предприятия. Главным конструктором ЦКБ «Луч» и руководителем проекта НЭК «Терра-3» совершенно неожиданно был назначен работавший в одном из оборонных конструкторских бюро опытный конструктор-ракетчик М.Г.Васин, который никогда ранее не занимался лазерами и лазерными системами. Его назначение свидетельствовало о том, что руководство военно-промышленного комплекса считало принципиальные научно-технические проблемы лазерного ПРО решенными и возлагало на вновь созданную организацию в основном грамотное конструкторско-техническое оформление этих решений. Будущее показало глубокую ошибочность этого мнения, сформировавшегося под влиянием оптимистических прогнозов и докладов многих ученых и конструкторов. Директор ЦКБ «Луч» И.В.Птицын был энергичным и, как принято говорить, «пробивным» администратором и

хозяйственником. Он смог (конечно, при большой поддержке «сверху») быстро развернуть на окраине Москвы строительство комплекса зданий для вновь создаваемого предприятия и решить многие другие вопросы его организационного и хозяйственного становления. К сожалению, И.В.Птицын, часто не проявляя чувства такта, с трудом находил общий язык с учеными и конструкторами, что через несколько лет и стало причиной его вынужденного ухода с поста директора, когда задачи первоначального материального становления фирмы были им успешно решены. Заместителями М.Г.Васина стали возглавившие основные подразделения (и направления работ) В.Ф.Морсков (система наведения лазерного луча комплекса «Терра-3»), Н.Д.Устинов (лазерная локация, включая локатор ЛЭ-1), В.К.Орлов (мощные лазеры). Теоретический отдел ЦКБ возглавил крупный специалист по теории обработки сигналов (в том числе, лазерных) П.А.Бакут.

Основные сооружения НЭК на Балашихинском полигоне выполнялись из монолитного железобетона и особо прочных конструкций, чтобы выдерживать воздействие ударной волны и, возможно, осколков, возникающих при одновременном взрыве многих фотодиссоционных лазеров. Предусматривалось, что общая масса взрывчатого вещества в лазерах может достигать 30 тонн. Здание системы наведения было удалено от площадки для взрывных лазеров и бункера ВКР-лазера на расстояние около 1 км для того, чтобы взрывная волна достигала здания, в котором находилась точная оптика системы наведения уже после того, как импульс излучения уйдет к цели, также чтобы защитить систему наведения от фрагментов лазера. Излучение от ВКР-лазера к системе наведения предполагалось передавать по подземному каналу, соединявшему здания. В начале 70-х годов военные строители начали возведение всех зданий и сооружений НЭК. Строительство шло, к счастью для разработчиков, достаточно медленно, что позволяло неоднократно вносить изменения в схему НЭК по мере более глубокого понимания характера проблем, выявлявшихся в ходе экспериментов.

В ЦКБ «Луч» под руководством В.К.Орлова, Е.М. Земскова и В.М.Казанского при участии физиков из ФИАНа (В.С.Зуева и других) и во ВНИИЭФ под руководством С.Б.Кормера, Г.А.Кириллова (лазеры со взрывной накачкой) и А.И.Павловского (лазеры с электроразрядной накачкой) при научном руководстве ФИАНа продолжались экспериментально-конструкторские работы по мощным фотодиссоционным лазерам. После того как во ВНИИЭФ командой С.Б.Кормера и Г.А.Кириллова были успешно испытаны экспериментальные взрывные лазеры с энергией до 1 МДж, предстояло создать промышленные образцы лазеров, конструкции которых соответствовали бы условиям серийного заводского производства. Прототипы таких лазеров разрабатывались как в ЦКБ «Луч» (лазер ФО-21 и др.), так и во ВНИИЭФ (лазер Ф-1200). В дальнейшем лазер ФО-21 был модернизирован, его конструкцию удалось изменить, предельно упростить и удешевить почти в 10 раз. Острословы дали

ему название «бедняк». Крупногабаритная оптика диаметром 1.2 метра для фотодиссоционного лазера изготовлялась на ЛОМО. Этот диаметр был выбран в соответствии со стандартным размером труб, выпускавшихся металлургической промышленностью для газопроводов. Были разработаны и выпускались серийно модульные фотодиссоционные лазеры типа ФО-32 с меньшей энергией (несколько десятков килоджоулей в импульсе), широко применявшиеся в экспериментах.

Продолжавшиеся во ВНИИЭФ под руководством А.И.Павловского работы по исследованиям электроразрядных фотодиссоционных лазеров привели к созданию в 1974 году экспериментального стендового лазера с энергией излучения в импульсе около 90 кДж. Лазер размещался в прочном железобетонном каземате, рядом с которым устанавливались ВМГ. Для передачи энергии от ВМГ в каземат использовалось большое число специальных высоковольтных кабелей, позволявших подводить к лазеру ток в сотни тысяч ампер. Исследований и разработок потребовала проблема сильных магнитных полей, возникающих при мощном электрическом разряде в объеме лазера. Эти поля могли нарушить его работу из-за эффекта магнитного расщепления и сдвига линий активных частиц иода. Совместными исследованиями ВНИИЭФ и ГОИ были найдены методы борьбы с этими нежелательными эффектами. Только через много лет, в начале 80-х годов, в Лос-Аламосской лаборатории были созданы образцы йодных фотодиссоционных лазеров с накачкой от ВМГ. Энергия этих лазеров, как сообщалось, не превышала несколько килоджоулей в импульсе.

В середине 60-х годов, когда лазеры уже всю «стреляли» в лабораториях физиков, казалось, что их дальнейший путь в военную технику прост и очевиден: конструкторам надо лишь инженерно «оформить» исследовательские образцы лазеров, и можно отдавать их военным. Но жизнь быстро опровергла эти «голубые» мечты. Превращение настольных академических лазеров в мощные полевые конструкции потребовало сложного и длительного этапа работ по их масштабированию до требуемых значений выходной энергии, улучшению практически всех их характеристик, отработке надежных, по возможности простых в эксплуатации технических решений, изысканию способов их сборки и технического обслуживания в условиях полигона. Эти работы требовали значительного количества полигонных экспериментов для отработки деталей конструкции и изучения распространения мощного луча на реальной трассе. Существовавшие испытательные площадки не справлялись с объемом работ, и стало ясно, что надо создавать специализированную стендово-отрабочную и испытательную базу для мощных лазеров, какими располагают все другие отрасли оборонной техники: авиация и космонавтика, артиллерия, ракетная техника и т. п.

Недостаточная испытательно-полигонная база ЦКБ «Луч» тормозила развитие работ не только по фотодиссоционным лазерам, но и по другим высокоэнергетическим лазерам, появившимся в начале 70-х годов: CO₂- и СО-лазерам, химическим и твердотельным лазерам. Создавать и испытывать

мощные лазеры в московских лабораториях было практически невозможно. Это вскоре осознал и Н.Г.Басов. Поэтому при его поддержке были начаты поиски места, где можно было бы расположить лазерный полигон. Требовалось найти участок площадью в несколько десятков квадратных километров где-нибудь в центральной части страны, достаточно изолированный, но находящийся вблизи хороших дорожных коммуникаций и энергетических сетей. После многомесячных поисков и осмотров ряда мест обратили внимание на заброшенное военными танковое стрельбище в 20 км юго-западнее Владимира. Лесисто-болотистая местность, окаймленная торфяниками, была практически не освоена, не имела ни населенных пунктов, ни дорог (кроме лесных), ни энергетических сетей. Однако территория находилась вблизи трассы Москва-Горький, неподалеку проходили мощные электрические линии и железнодорожная ветка (к старым торфоразработкам), до Москвы было всего 180 км. Министерство обороны СССР охотно согласилось предоставить неиспользуемое учебное поле для развития лазерных работ, и уже в начале 1971 года вышло распоряжение правительства СССР о создании Междуведомственного научно-исследовательского испытательного центра и начались изыскания на месте будущего строительства.

Центр получил также открытое название ОКБ «Радуга». Его начальником был назначен генерал-майор И.С.Косьминов, ранее принимавший участие в создании ракетной техники и крупнейших ракетных полигонов страны. История развития ОКБ «Радуга» заслуживает отдельного рассказа. Скажем лишь, что усилиями советских военных строителей удалось в сравнительно короткий срок создать в глубине владимирских лесов, в условиях болот и бездорожья, крупный испытательно-производственный (а начиная с 80-х годов - и исследовательско-конструкторский) комплекс с изолированными испытательными площадками, оснащенными необходимыми сооружениями, трассами, измерительной техникой, значительной энергетикой и всеми видами инженерных сооружений. Более того, был построен опытный завод по производству мощной лазерной техники. Около испытательного центра вырос современный городок Радужный (сейчас в нем около 20 000 жителей) с школами, детскими садами, медицинскими учреждениями. Пожалуй, это единственный в мире город, появление которого было обусловлено проблемами создания мощных лазеров, необходимостью их испытаний и исследований. К середине 80-х годов в ОКБ «Радуга» работало несколько тысяч человек, из них около тысячи испытателей и исследователей. На испытательной базе велись работы по лазерам разных типов: твердотельным, CO₂- и СО-лазерам, лазерам на парах металлов и др.

Несколько позже, в середине 70-х годов, в ОКБ «Радуга» были созданы экспериментальные лазерные локационные стенды, в том числе с синтезированной апертурой, однако использовать эти локаторы в программе «Терра-3» не успели. Н.Г.Басов неоднократно бывал на лазерных стендах ОКБ «Радуга», где шло рассмотрение и обсуждение результатов работ по

мощным лазерам, также проводились заседания НТС с участием всех ведущих лазерщиков страны, а иногда и президентов АН СССР А.П.Александрова и Г.И.Марчука. Периодически результаты работ демонстрировались в ОКБ «Радуга» руководителям правительства СССР, министрам и военачальникам.

По инициативе Н.Г.Басова, наряду с созданием НЭК фотодиссоционных лазеров и лазеров-сумматоров для этого комплекса, в 70-х годах был осуществлен целый ряд программ исследований и разработок по другим видам мощной лазерной техники. Кратко остановимся на основных направлениях этих исследований, во многом носивших пионерский характер, хотя в ряде случаев и воспроизводивших в расширенном по энергетике масштабе работы зарубежных и советских лазерных лабораторий. Программы работ, особенно в начале 70-х годов, часто дополнялись и уточнялись при появлении новых научных идей в СССР или за рубежом. Мы не сможем здесь остановиться на всех подробностях этих работ, результатам которых посвящены сотни статей и научных докладов.

Работы по импульсным химическим лазерам были начаты как альтернатива фотодиссоционным лазерам. Использование энергии химических реакций в активной среде лазера могло, как надеялись ученые, привести к значительному повышению эффективности его работы (росту КПД) и соответствующему снижению требований к источнику накачки (уменьшению количества взрывчатого вещества или полному отказу от его применения в системах инициирования химической реакции), а также к созданию лазера многократного действия. В работе, наряду с исследователями из ФИАНа (группа А.Н.Ораевского), основное участие принимали коллективы ученых ВНИИЭФ (С.Б.Кормер, подразделение М.В.Синицына), ИХФ (коллектив, руководимый В.Л.Тальрозе), ГИПХ (под руководством В.С. Шпака) и некоторых других институтов. Изучался, в первую очередь, химический лазер на основе реакции фтора и водорода (или дейтерия), энергетические характеристики которого оказались наиболее высокими. Интерес к этому лазеру вызывался и надеждой на осуществление в нем цепной химической реакции, резкое снижение требований к устройству, инициирующему поджиг химической реакции. Группа ВНИИЭФ совместно с учеными ГИПХ работала импульсный химический лазер с инициированием химической реакции от, так называемой, взрывной лампы, т. е. источника излучения на основе ударной волны относительно маломощного взрыва, в надежде на создание в дальнейшем конструкции лазера, не разрушающейся при таком взрыве. Исследования и опыты привели к созданию нескольких моделей взрывных импульсных химических лазеров (одноразовых) с энергией в импульсе десятков килоджоулей. Однако количество взрывчатого вещества, требовавшегося для инициирования химической реакции, все же оставалось значительным, хотя и меньшим, чем для такого же масштаба, и лазеры разрушались в ходе экспериментов. В ИХФ проводились как фундаментальные исследования химико-физических процессов в импульсных химических лазерах, так и эксперименты с

моделями химических лазеров полного масштаба, в которых, в основном, применялись невзрывные источники инициирования химической реакции. В филиале ИХФ в Черноголовке (под Москвой) созданы первая модель лазера с объемом камеры 1000 л и несколько позже, после строительства специального стенда, модель с камерой объемом несколько кубических метров. Однако в этих лазерах использовался недостаточно мощный источник инициирования химической реакции (импульсные лампы-вспышки) и их характеристики оказались невысокими. Работы по импульсным химическим лазерам дали много результатов физического характера, но не привели к созданию лазеров, конкурировавших с фотодиссоционными лазерами по энергетике излучения.

В начале 70-х годов, после появления первых сообщений в СССР и за рубежом о работах по CO_2 -лазерам с использованием электронных пучков для организации устойчивого электрического разряда лазера при высоком (атмосферном) давлении активной среды, в СССР были начаты работы по высокоэнергетическим лазерам этого типа, получившим в программе «Терра-3» название электроионизационных, хотя этот термин использовался не всеми. Вновь на вооружение была взята идея увеличения энергии в тысячи раз по сравнению с достигнутой в то время. Выбор схемы лазера на ранней стадии был непростым. Применялась идеология лазера с замкнутым контуром, в котором рабочее вещество (смесь газов) с помощью мощного вентилятора прокачивалось через оптический резонатор с электрическим разрядом, где шла генерация излучения. Далее нагретый газ поступал в охлаждающее устройство, после чего вновь использовался для работы. Газодинамическая схема такого лазера была сходна с аэродинамическими трубами, давно и широко применявшимися как инструмент для газодинамических авиационно-космических разработок и исследований. Был создан ряд модельных систем с меньшей, чем у лазера ЗД-01 энергетикой, что позволило провести инженерно-физические исследования и проверить как некоторые технические решения, так и достижимые параметры электроионизационных лазеров. Лазер ЗД-01 отработывался и совершенствовался до конца 70-х годов, и на нем была получена средняя мощность излучения несколько сотен киловатт. В 1976 году лазер ЗД-01 начал действовать. Потребовалось время, чтобы его сложные системы, включая специально разработанные мощные электронные пушки для организации разряда в мощной струе смеси CO_2 и других газов, вышли на характеристики, близкие к расчетным. Однако угловая расходимость излучения этого лазера, как и в случае с фотодиссоционным лазером, оказалась вначале неудовлетворительной. В дальнейшем лазер ЗД-01 (уже вне рамок проекта «Терра-3») был заменен другим, более совершенным электроионизационным лазером, разработанным под руководством Н.В.Чебуркина. Потребовалось несколько лет работы, прежде чем были найдены способы получения требуемой расходимости и внесены необходимые изменения в схему и конструкцию лазера.

В 1975 году на Балхашском полигоне продолжалось строительство

здания для системы наведения НЭК «Терра-3» и начался монтаж оборудования. В целом темпы строительства на полигоне были невысокими, и, как правило, его реальный ход на несколько лет отставал от директивных графиков. К тому времени в руководстве ЦКБ «Луч» произошли изменения. Главным конструктором ЦКБ и НЭК «Терра-3» был назначен Н.Д.Устинов, директором предприятия стал спокойный, рассудительный прагматик и опытный инженер Б.Е.Львов. Изменилось не только руководство, но и название фирмы: она была переименована в ЦКБ «Астрофизика».

Строительство НЭК на полигоне не могло не привлечь внимания США, которые с помощью своей национальной системы спутникового контроля, очевидно, следили за состоянием дел на Балхашском полигоне. В конце 70-х годов в американской печати появилась информация о том, что русские строят на полигоне Сары-Шаган на берегу озера Балхаш лазерную установку для ПРО. Надо сказать, что впоследствии американскими военными и гражданскими энтузиастами СОВЭТЭТ эта правдивая в своей основе информация преувеличивалась и обыгрывалась весьма энергично. Ярким примером этого может служить, например, изданная в 1983 году в США книга «Лучевая оборона - альтернатива ядерному разрушению», где утверждалось, что русскими «... недавно был испытан усовершенствованный йодный лазер, с помощью которого сбита баллистическая ракета, что продемонстрировало использование лазера в качестве стратегического оружия. Разведывательные источники США сообщают, что вблизи советских испытательных площадок разбросаны сбитые головные части, свидетельствующие о том, что русские успешно сбивают баллистические ракеты-мишени». Рисунок зданий НЭК «Терра-3», выполненный на основе данных космической фоторазведки, приводился в изданиях Министерства обороны и госдепартамента США и в ряде других аналогичных публикаций. Сведения о советских «успехах» в области лазерного ПРО были, мягко говоря, несколько преувеличенными. А разбросанные вокруг зданий НЭК «Терра-3» обломки вышедшей из строя строительной техники на самом деле свидетельствовали больше о стиле работы строителей, а не об успехах лазерщиков.

Много позже, в 1989 году, когда наступил период разрядки, на Балхашском полигоне с личного разрешения М.С.Горбачева побывала большая группа американских политиков, специалистов и журналистов, которым о или показаны некоторые «остатки» НЭК «Терра-3», включая систему наведения лазерного луча и недостроенное здание, в котором по проекту должны были размещаться электроразрядные фотодиссоционные лазеры..

После десяти лет работы становилось ясно (в том числе и руководству) что лазерное оружие для поражения головной части баллистической ракеты на конечном участке их траектории пока создать не удастся. По-видимому, ведущие ученые, включая Н.Г.Басова, возглавлявшего научную часть проекта, пришли к этому выводу еще раньше. Было понятно, что энергетика лазеров и технические решения, использованные в НЭК «Терра-3», заведомо не могут обеспечить доставки к цели лазерной энергии, необходимой для

поражения головной части баллистической ракеты. Стали очевидными и трудности, возникающие при прохождении столь мощного излучения через атмосферу. Немалые проблемы выявились в ходе разработки и изготовления системы наведения луча, к которой, как и ко многим другим частям комплекса «Терра-3», предъявлялись крайне высокие требования по динамике и точности наведения луча, по лучевой прочности оптики и по ряду других характеристик.

Ко второй половине 70-х годов в руках создателей комплекса не было лазерного луча такой мощности, которая требовалась для поражения головной части баллистической ракеты. Более того, не были ясны и пути достижения требуемой энергетике. Разработчики из ЦКБ «Астрофизика» оказались в техническом тупике: параметры спроектированного и сооружаемого комплекса не позволяли надеяться на поражение головных частей баллистических ракет. Параллельно выполняемые по инициативе Н.Г.Басова исследования в области лазеров других типов хотя и привели к значительному улучшению энергетических характеристик этих лазеров, однако, как и в случае взрывных фотодиссоционных лазеров, не дали результатов, которые позволяли бы ожидать, что головную часть баллистической ракеты можно поразить лазерным излучением в близкой перспективе и при разумных затратах. Заметим, что американцы в начале 80-х годов, получив разведывательную информацию о работах СССР по взрывным фотодиссоционным лазерам, также создали такие лазеры с энергией в диапазоне килоджоулей в Лос-Аламосской лаборатории и стали изучать воздействие их излучения на материалы и объекты.

Начатые на полигоне во второй половине 70-х годов испытания системы наведения луча были еще далеки от завершения и сталкивались с большими трудностями, как техническими, так и организационными. При этих испытаниях вместо мощного лазера использовался имитатор - относительно маломощный лазер на стекле с неодимом. В целом работы шли крайне медленно и не дошли до этапа стрельб по реальным головным частям баллистических ракет (вопреки сообщениям американской печати). К 1977 году программа «Терра-3», формально существуя, лишилась внутренней динамики и напора, которые были характерны для нее вначале. Появлявшиеся у ученых ФИАН, ВНИИЭФ, ГОИ и других институтов новые идеи в области лазерной физики и техники часто были оригинальными и двигали вперед науку, но не решали все же проблем «Терры-3».

В целом в ходе научно-исследовательских программ по лазерам, выполнявшихся под руководством Н.Г.Басова не только в рамках проекта «Терра-3», были достигнуты значительные успехи. Были созданы лазеры различных типов с выдающимися энергетическими характеристиками. В ФИАН было исследовано новое явление в области нелинейной оптики лазеров - обращение волнового фронта излучения. Это крупное открытие позволило в дальнейшем совершенно по-новому и весьма успешно подойти к решению ряда проблем физики и техники мощных лазеров, прежде всего проблем формирования предельно узкого пучка и его сверхточного

наведения на цель. Впервые именно в программе «Терра-3» специалистами ВНИИЭФ и ФИАН было предложено использовать обращение волнового фронта для доставки энергии на мишень.

Итак, программа «Терра-3» находилась в кризисе, хотя продолжала существовать и финансироваться, под нее было создано специальное предприятие, развивалась производственная база, на нее работали десятки предприятий. Весь этот «маховик» продолжал крутиться и не мог быть разом остановлен. Признать прямо нерешаемость на существовавшем уровне техники поставленной задачи ни ученые, ни конструкторы, ни военные заказчики долго не хотели. Но работы велись уже более 10 лет, а создание лазерной системы ПРО, казалось, отодвигалось все дальше и дальше. Ощущение тупиковости работы (в смысле создания оружия для ПРО) постепенно проникало не только в умы разработчиков, но и становилось понятным руководству. Кроме того, за эти годы в стране был достигнут значительный прогресс в создании ракетных систем ПРО, начинала действовать первая система ПРО Москвы, и актуальность лазерной системы существенно уменьшилась.

Программа «Терра-3» привела к значительному прогрессу в области физики и техники высокоэнергетических лазеров в СССР, дала толчок к созданию принципиально новых технологий, в частности в нелинейной оптике. Эта программа позволила вывести физику и технику мощных лазеров (в первую очередь импульсных и частотно-импульсных) на уровень, превосходивший в то время достижения других стран. В результате теоретических и экспериментальных работ, проведенных в рамках лазерной программы, возглавлявшейся Н.Г.Басовым, удалось прийти к глубокому пониманию физики процессов в высокоэнергетических лазерах и решить серьезные технические и конструкторские проблемы. До настоящего времени эти достижения в значительной степени остаются фундаментом для развития техники мощных лазеров в России. Были получены результаты мирового уровня также в ряде смежных направлений (распространение лазерных пучков в атмосфере, импульсные источники света, взаимодействие излучения с веществом, химия и технология создания активных сред и компонентов лазеров). Многие научные и технические достижения были использованы в последующих работах, включая работы по инерциальному термоядерному синтезу, продолжающиеся до сих пор. Именно Н.Г.Басов, О.Н.Крохин и их ближайшие сотрудники были пионерами и инициаторами работ по управляемому термоядерному синтезу на основе использования для сжатия дейтерий-тритиевой мишени импульсного излучения высокоэнергетических лазеров.

Ко второй половине 70-х годов руководство военно-промышленного комплекса, и в первую очередь министр оборонной промышленности С.А.Зверев, систематически знакомясь с очередными докладами ученых о ходе работ, осознал, что задача лазерного ПРО пока не решена. В связи с этим решение о фактическом прекращении программы разрабатывалось и принималось «кабинетным» путем. В Министерстве оборонной

промышленности и в ВПК в начале 1978 году было подготовлено постановление правительства, которое должно было «перевести стрелки» работы с нерешенной проблемы на иную насущную задачу обороны страны. Предусматривалось использование для новой задачи основной части технических достижений в области мощных лазеров, полученных в ходе работ по программе «Терра-3» под общим руководством Н.Г.Басова (а они, безусловно, были весьма солидными). Реализации решения способствовало то обстоятельство, что еще в начале 70-х годов в ЦКБ «Луч» были начаты работы по другим направлениям оборонных и гражданских применений лазеров. Некоторые из них развивались успешно. После серии совещаний и обсуждений состояния работ у министра оборонной промышленности С.А.Зверева было принято решение о прекращении работ по программе «Терра-3», и в 1978 году с согласия Министерства обороны СССР программа была закрыта.

Итогом программы был колоссальный подъем как научного, так и технического уровня исследований и разработок высокоэнергетических лазеров в СССР. Достигнутые в конце 60-х - середине 70-х годов энергетические характеристики не превзойдены до сих пор. В стране была создана необходимая для обеспечения масштабных лазерных программ передовая конструкторско-техническая, полигонно-испытательная и производственная база. Были сформированы новые коллективы ученых и инженеров, успешно работающие и в наши дни, расширились лазерные лаборатории в ведущих научных центрах страны в Москве, Ленинграде, Сарове, Новосибирске и во многих других местах. Эти коллективы, наряду с разработками оборонного характера, успешно выполняли и другие программы, инициированные идеями Н.Г. Басова, например создание мощных лазеров для осуществления термоядерного синтеза с инерциальным удержанием плазмы, чему Н.Г.Басов уделял особое внимание. В ходе изысканий впервые к высокоэнергетическим лазерам были применены идеи нелинейной оптики, в частности обращение волнового фронта. Основной движущей силой этих программ в течение долгих лет были интеллектуальная мощь, неиссякаемая энергия и предвидения Николая Геннадиевича Басова.

Лазерная программа США, включала в себя в разные годы ряд подпрограмм. В частности, программу «Лазер воздушного базирования» (Airborne Laser - ABL). Лазер с мегаваттным лучом, поднимаемый в воздух на крыльях Boeing 747, способен уничтожать межконтинентальные ракеты на стадии взлёта с приличной дистанции. Сегодня почти все ингредиенты этого экзотического оружия уже выполнены в металле. Впереди - ряд испытаний. Основные участники программы ABL: Boeing (главный подрядчик, отвечающий за координацию работ, поставку самолётов-носителей этого оружия, а также интеграцию всех систем), Northrop Grumman (создатель уникальных лазеров, в том числе - основного), Lockheed Martin (комплекс наведения), американские ВВС (USAF) и Агентство по противоракетной обороне (MDA). Бюджет программы ABL в 2006 году составил 471,6 миллиона долларов. Натурные испытания системы прошли в 2008 году. В

ходе их химический лазер выполнял пробные стрельбы по ракетам-мишеням.

По замыслу разработчиков, группа самолётов Boeing 747-400, с мощнейшими лазерами на борту, в процессе дежурства в радиусе нескольких сотен километров от расположения ракетных установок, должна выполнять «восьмёрки» выше облаков. На достаточном удалении от границ потенциального противника, чтобы не слишком опасаться его ПВО, но в то же время достаточно близко, чтобы иметь возможность сбить взлетающие межконтинентальные ракеты ещё на стадии разгона.

Точные параметры лазера Northrop Grumman не сообщает, но в пресс-релизе о его наземном испытании в ноябре 2004 года говорится, что лазер для системы AVL «относится к мегаваттному классу». Боевой лазер является связкой из шести одинаковых лазерных модулей, расположенных в форме V6, словно шестицилиндровый двигатель какого-нибудь гигантского грузовика. Только на вал тут выводится не вращение, а луч. Боевой лазер - инфракрасный химический, кислородно-иодный (Chemical Oxygen Iodine Laser - COIL). Для его работы на борту лайнера имеется целая батарея баков с химическими реагентами, которые в момент залпа прогоняют через систему мощные турбонасосы. COIL монтируется в задней части фюзеляжа Boeing 747. Оттуда его луч проходит вперёд к носу лайнера, через сложную оптическую систему. Каждый самолет, оснащенный таким лазером, должен будет нести около 450 килограммов хлора, столько же аммиака, примерно 5,4 тонны перекиси водорода и более 800 литров серной кислоты.

Самолёт с системой AVL определяет старт баллистических ракет по раскалённому выхлопу их двигателя при помощи россыпи инфракрасных датчиков. На вершине фюзеляжа имеется довольно мощный углекислотный или твердотельный лазер, с помощью которого машина определяет расстояние до цели. Приёмник этой системы также помогает другим датчикам в определении её координат. Далее в действие вступает поворотная шаровая башня на носу лайнера, где раскрывается окно с 1,5-метровой (в диаметре) оптической системой. Через эту систему в сторону цели будет направлен боевой лазер, но сначала, через неё же, на цель направляют ещё два вспомогательных лазера (сами они спрятаны в середине самолёта) умеренной мощности. Отражения этих двух разных лазеров от цели (так же, как и её изображение), поступают в многочисленные датчики системы. Электроника удерживает прицел на ракете, а также по возвратившимся сигналам определяет параметры атмосферы, чтобы скорректировать оптику, управляющую боевым лучом, фокусирующемся в пятно размером с баскетбольный мяч на расстояниях во многие сотни (до 300) километров до цели. Управление лазером и оптикой осуществляется с помощью компьютерной системы, обеспечивающей отслеживание, идентификацию потенциальных целей и определение приоритетных целей для поражения.

Создатели COIL сообщают также, что в последних на данный момент наземных тестах он достиг уровня мощности и продолжительности работы, которые достаточны для разрушения поднимающейся межконтинентальной

ракеты. Любопытно, что лазер для тестов смонтировали не просто в здании, а в списанном фюзеляже от Boeing 747-200, чтобы все системы COIL взаимодействовали и размещались именно так, как они будут работать в воздухе - на борту модифицированных 747-х, которые станут носителями нового оружия.

В начале этого года Northrop Grumman построила и твердотельный лазер системы наведения, названный маяком (Beacon Illuminator Laser - BILL). BILL, один из двух вспомогательных лазеров, спрятанных внутри лайнера, он высвечивает пятно на цели. Именно по этому пятну компьютерная система определяют искажения, вызванные атмосферными помехами (как уже сказано, оптическая система AVL является не только излучателем, но и приёмником с 1,5-метровым зеркалом, фактически - приличным телескопом). Вычисленные искажения компенсируются деформируемым (адаптивным) зеркалом в составе оптической системы, выстреливающий в цель, собственно, боевой луч. Система наведения оружия также включает ещё один твердотельный лазер - Tracking Illuminator (TILL), который отвечает за сопровождение цели в процессе стрельбы. И он также отправляется на цель через главную оптическую систему.

Испытания всего комплекса наведения: управляемой оптики, BILL и TILL на борту первого самолёта, оборудованного этим оружием (за исключением самого боевого лазера) - это была главная задача всей программы AVL на 2006 год. В ходе этих испытаний лазеры были нацелены на военный самолет NC-135 с нарисованной баллистической ракетой на борту.

Другой военной лазерной программой США является проект BBC ARMS (Aerospace Relay Mirror System воздушно-космическая зеркальная система защиты)

Вообще лазерное оружие как таковое уже состоит на вооружении американской армии. Правда, речь идет о так называемых лазерных ружьях нелетального действия. Такие лазер-ганы (ружья) в зависимости от мощности способны ослепить, например, механика-водителя вражеской бронетехники, снайпера, пилота низколетящего штурмового вертолета или вывести из строя чувствительные элементы электронно-оптических систем противника. Подобными пушками американское командование вооружало своих военных в Ираке с целью временно ослеплять водителей, игнорирующих предупреждения на пропускных пунктах. По их мнению, это снизило количество потерь среди местных жителей, которые не обращали внимания на предупреждающие сигналы и попадали под огонь американских солдат. На карабинах M-4, используемых американской армией в Ираке, было помещено трубообразное устройство длиной 27 мм, способное выдавать луч лазера. Как говорят военные, это временно ослепляло водителей и не приводит к полной потере зрения.

Впервые о работах по созданию стратегической лазерной системы Министерство обороны США официально заявило 8 мая 2003 года. Специалисты компании Boeing и BBC США разработали и опробовали

принципиально новые лазерные боевые системы, которые могут мгновенно поразить цель в любой точке планеты и околоземного пространства. Система ARMS включает сверхмощные стационарные лазеры наземного или морского базирования и систему зеркал, которая располагается на дирижаблях и беспилотных самолетах, а в перспективе и на космических спутниках. Работа над проектом заняла четыре года и стоила 20 млн. долларов США. Проведенные испытания на базе ВВС США Киртленд в штате Нью-Мексико подтвердили боеспособность новой системы. Официальная цель проекта создание системы противоракетной обороны. Но, кроме того, система зеркал позволяет направлять лучи сверхмощных лазеров практически в любую точку Земли. Новое оружие преодолевает любое неблагоприятное воздействие атмосферы.

В течение нескольких недель на базе в Киртленде (Kirtland AFB, NM) проводилось тестирование прототипа нового оружия по проекту ARMS (Aerospace Relay Mirror System воздушно-космическая релейная зеркальная система). Специалисты из ВВС США и компании Boeing применили лазер мощностью 1 кВт и отражающую систему, расположенную на расстоянии 3 км. Лазерный луч успешно был перенаправлен и попал в цель. Система состояла из двух зеркал шириной 75 см, находящихся близко друг к другу. Они были подвешены на высоте 30 м с помощью крана. В будущем американские специалисты намерены разместить отражающую систему на больших высотах с помощью различных платформ: высотных дирижаблей, беспилотных высотных самолетов или спутников. Это позволит наносить удар по любым целям на земле и в воздухе практически мгновенно. Принимающее зеркало будет собирать свет и затем перенаправлять его через специальную фокусирующую систему, которая определяет помехи, возникшие в атмосфере, и корректирует сигнал. После корректировки второе зеркало посылает луч на заданную цель. Лазерная установка при этом должна иметь мощность 100 - 1000 кВт.

Эти испытания важнейший этап в создании технологии переизлучающих (релейных) лазеров показали, что отражающие зеркала вполне способны сконцентрировать энергию наземной лазерной установки в нужной точке, увеличивая тем самым дальность действия лазера, заявил Пат Шанахан, вице-президент и генеральный директор Boeing Missile Defense Systems (подразделение компании, ведущее исследования в рамках ПРО). Судя по заявлениям, цель работ создание системы противоракетной обороны. Однако уже очевидно, что одной лишь этой задачей дело не ограничится. Такое зеркало может быть размещено и в космосе. Тогда сценарий, обыгранный во многих фантастических боевиках (например, «Golden Eye» из знаменитой бондианы), вполне может стать реальностью. Хотя для этого потребуются астрономические суммы, лазер гигантской мощности и долгие годы исследований, страна, первой получившая такое оружие, сможет молниеносно вмешиваться в процессы в любой точке на Земле и в космосе. Система космических зеркал способна перенаправить лазерный импульс в любую точку на планете или в космическом пространстве. С ее помощью

можно поражать стационарные объекты на поверхности Земли, движущиеся в воздушном и космическом пространстве цели, минимизировав при этом побочные факторы.

Идея создания так называемого тактического высокоэнергетического лазера (THEL, другое название «Наутилус»), способного уничтожать любые летящие цели, показалась тогда весьма заманчивой. Начиная с 1996 года, США и Израиль вложили в проект «Наутилус» 400 млн. долларов. Был создан действующий прототип лазерного орудия, но он оказался слишком громоздким, и продолжение работ было заморожено.

Лазерные блоки, расположенные на северной границе Израиля, должны были противостоять ракетным атакам Хезболлах. Кончилась затея буквально ничем. Лазерные системы, испытанные в 2000 и 2002 годах, оказались в состоянии перехватывать ракеты и артиллерийские снаряды. Однако военные признали, что во время тестов одновременно запускалось не более двух ракет. При том, что некоторые установки, применяемые боевиками, способны выпускать до 40 ракет одним залпом. Еще одной проблемой является снаряжение лазера высокотоксичными химикалиями с тем, чтобы производить достаточное количество необходимой энергии, При этом лазер способен без перезарядки всего на пару выстрелов по 3 тысячи долларов каждый. Кроме того, лазерный передвижной блок размером в 6 огромных туристических автобусов представляет собой слишком лакомую цель для противника.

Глава 5. Сканирующие зондовые микроскопы. Ионные ловушки. Конденсаты Бозе-Эйнштейна

В 1981 году Герд Бинниг и Генрих Рёер из лаборатории IBM в Цюрихе представили миру сканирующий туннельный микроскоп (СТМ). С его помощью были получены поразившие всех изображения поверхности кремния в реальном масштабе. Человек впервые смог увидеть атомы и прикоснуться к ним.

Развивая идеи, заложенные в СТМ, в 1986 году Герд Бинниг, Кэлвин Куэйт и Кристофер Джербер создают атомно-силовой микроскоп (АСМ), благодаря которому были преодолены присущие сканирующим туннельным микроскопам (СТМ) ограничения. В свою очередь АСМ стал родоначальником широкого семейства сканирующих зондовых устройств и использующих их технологий, которое продолжает увеличиваться и по сей день. В том же 1986 году Г. Бинниг и Г. Рёер были удостоены Нобелевской премии в области физики за открытие принципа туннельной, атомно-силовой и световой сканирующей микроскопии.

Немецкий физик Герд Карл Бинниг (Gerd Karl Binnig) родился 20 июня 1947 года во Франкфурте-на-Майне в семье Карла Франца Биннига, заводского инженера, и Рут (в девичестве Браке) Бинниг, чертежницы. Завершив среднее образование в школе Рудольфа Коха, он получил докторскую степень по физике за работу по сверхпроводимости во Франкфуртском университете в 1978 году.

Сразу же после получения степени Бинниг стал научным сотрудником исследовательской лаборатории в корпорации «Интернэшнл бизнес мэшинс» (IBM) в Цюрихе, Швейцария. Здесь он стал сотрудничать с Рорером в исследованиях поверхности материалов. Ученые обратились к данной проблеме, привлеченные тем, что прежде полного анализа поверхности материалов получить, по существу, не удавалось. Трудности заключались в том, что расположение атомов на поверхности твердого тела существенно отличается от их расположения внутри него, так что известные методы исследования бесполезны, когда дело касается поверхности. Однако поверхность представляет большой интерес, поскольку именно здесь происходит большинство взаимодействий между телами.

Для исследования поверхности материалов Бинниг и Рорер решили использовать один из вариантов квантово-механического эффекта, известного под названием туннельного. Этот эффект, впервые экспериментально подтвержденный в 1960 году, представляет собой один из путей, в которых проявляется так называемый принцип

неопределенности Гейзенберга. Согласно этому принципу, названному по имени немецкого физика Вернера Гейзенберга, невозможно измерить одновременно положение и скорость элементарной частицы. В результате положение такой частицы, как электрон, «размазывается» по пространству: частица ведет себя как размытое облако материи. Такое материальное облако может «туннелировать», или диффундировать, между двумя поверхностями, даже если они и не соприкасаются, во многом подобно тому, как вода может просачиваться сквозь почву из одной лужи в другую.

Туннельный эффект был хорошо известен к тому времени, когда Бинниг и Рорер начали совместную работу, и даже использовался – хотя порой и довольно грубо – при исследовании природы поверхностных взаимодействий в «сэндвичах» из материалов. Все, что оставалось сделать Биннигу и Рореру, так это позволить электронам туннелировать сквозь вакуум, и это идея неожиданно оказалась плодотворной. Их подход привел, в конце концов, к созданию нового инструмента, названного сканирующим туннелирующим микроскопом. Основной принцип, лежащий в основе этого прибора, включает в себя сканирование поверхности твердого тела в вакууме тонким кончиком иглы. Между кончиком и образцом приложено напряжение, а расстояние между ними поддерживается настолько малым, чтобы электроны могли через него туннелировать. Появляющийся в итоге поток электронов называется туннельным током. Величина туннельного тока экспоненциально зависит от расстояния между образцом и кончиком иглы. Следовательно, водя иглой по образцу и измеряя ток, можно составить карту поверхности в атомном масштабе.

Бинниг и Рорер впервые успешно опробовали туннелирующий микроскоп весной 1981 года. Вместе с двумя другими служащими компании IBM Кристофом Гербером и Эдмундом Вейбелем им удалось различать особенности высотой всего в один атом на поверхности кальциево-иридиево-оловянных кристаллов. Аналогичный прибор был создан раньше и независимо американским физиком Расселом Янгом в Национальном бюро стандартов США с помощью несколько отличного принципа, который обеспечивал значительно более низкую разрешающую способность.

При разработке сканирующего туннелирующего микроскопа группа из IBM встретила с существенными трудностями: прежде всего, пришлось устранить все источники вибрационного шума. Вертикальное положение сканирующего кончика должно контролироваться с точностью до доли диаметра атома, поскольку туннельный ток существенно зависит от расстояния между кончиком и исследуемым образцом. Уличные шумы и даже шаги могли вызвать сотрясение тонкого прибора. Сначала Бинниг и Рорер решили справиться с задачей, подвесив микроскоп с помощью постоянных магнитов над чашей из сверхпроводящего свинца,

поставленной на тяжелый каменный стол. Сам стол они изолировали от здания лаборатории с помощью надувных резиновых шин. Чтобы передвигать кончик иглы с высокой точностью, использовались пьезоэлектрические материалы, которые сжимаются или расширяются, если к ним приложить соответствующее напряжение. В результате дальнейших усовершенствований сканирующий туннелирующий микроскоп может ныне разрешить по вертикали размеры до 0,1 ангстрема (1 стомиллиардная доля метра, или приблизительно около одной десятой диаметра атома водорода). Разрешающая способность по горизонтали в 2 ангстрема достигнута благодаря использованию сканирующих кончиков шириной всего лишь в несколько атомов, а кончики шириной в 1 атом разрабатываются в настоящее время. После того как в конструкцию сканирующего туннелирующего микроскопа были внесены усовершенствования, он стал обычным инструментом во многих исследовательских лабораториях. Кроме вакуума, этот инструмент оказывается эффективным и во многих других средах, включая воздух, воду и криогенные жидкости. Он применяется для изучения различных образцов, отличных от неорганических веществ, в частности вирусов.

Бинниг и Рорер разделили в 1986 году половину Нобелевской премии по физике «за изобретение сканирующего туннелирующего микроскопа». Другую половину премии получил Эрнст Руска за работу над электронным микроскопом. Награждая премией Биннига и Рорера, представитель Шведской королевской академии наук заявил: «Очевидно, что эта техника обещает чрезвычайно много и что мы до сих пор были свидетелями лишь начала ее развития. Многие исследовательские группы в различных областях науки пользуются сейчас сканирующим туннелирующим микроскопом. Изучение поверхностей является важной частью физики, особенно необходимой в физике полупроводников и в микроэлектронике. В химии поверхностные реакции тоже играют важную роль, например в катализе. Можно, кроме того, фиксировать органические молекулы на поверхности и изучать их строение. Среди прочих приложений эту технику можно использовать для исследования молекул ДНК». Вспоминая о том, что он чувствовал, узнав о награждении, Бинниг отметил: «Это было прекрасно и ужасно одновременно», поскольку это было признанием большого успеха, но одновременно означало завершение «захватывающего открытия».

В 1969 году Бинниг женился на Лоре Ваглер, психологе; у них дочь и сын.

Кроме исследований, Биннига интересуют лыжи, футбол, теннис, гольф и парусный спорт. Талантливый музыкант, он сочиняет музыку, играет на скрипке и гитаре и поет. С 1986 года является членом ученого совета IBM, т.е. занимает один из высших научных постов в корпорации. Бинниг и Рорер получили за свою работу, кроме Нобелевской премии, и другие награды. В 1984 году они разделили премию Хьюлетта-Паккарда

Европейского физического общества и международную научную премию короля Фейсала и правительства Саудовской Аравии за усилия по созданию сканирующего туннелирующего микроскопа. Бинниг также награжден Физической премией Германского физического общества (1982).

Генрих Рорер (*Heinrich Rohrer*) — швейцарский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1986 года (половина премии, совместно с Гердом Биннигом «за изобретение сканирующего туннелирующего микроскопа»); вторую половину премии получил Эрнст Руска «за работу над электронным микроскопом») родился 6 июня 1933 года в г. Букс. После окончания школы осенью 1951 года Рорер поступил, случайно (согласно его автобиографии), в Высшую техническую школу в Цюрихе на физическое отделение. Среди его преподавателей были Вольфганг Паули и Пауль Шерер. В 1955 году Рорер начинает работать над диссертацией, на кафедре Йоргена Ольсена, по теме изменения длины сверхпроводников при переходе в сверхпроводящее состояние, индуцированном магнитным полем. В 1963 году Рорер перешел в исследовательские лаборатории IBM в Рюшликоне, где он работал над эффектом Кондо и после встречи с Гердом Биннигом разработал совместно с ним сканирующий туннельный микроскоп.

Сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ) – таково общее название такого типа устройств – используются сегодня в широком диапазоне дисциплин, включающем как фундаментальную науку о поверхности, так и традиционный анализ шероховатости поверхности. Не менее эффективно применение СЗМ-технологий для построения трехмерных изображений – от атомов до микронных образований на поверхности биологических объектов.

Сканирующий зондовый микроскоп — это инструмент со множеством возможностей. С его помощью можно строить реальные трехмерные изображения с широким динамическим диапазоном, охватывающим традиционные “сферы деятельности” оптических и электронных микроскопов. Это также и профилометр с беспрецедентным разрешением. Сканирующий зондовый микроскоп может измерять такие физические свойства, как, например, проводимость поверхности, распределение статических зарядов, магнитных полей и модуля упругости, свойства смазочных пленок и др. Современные приложения СЗМ весьма разнообразны.

Изображения, получаемые с помощью СЗМ, относятся к разряду создаваемых микроскопическими методами образам, которые достаточно легко интерпретировать. В случае электронного или оптического микроскопа принцип получения изображения базируется на сложных электромагнитных дифракционных эффектах. Поэтому иногда могут возникнуть затруднения при определении, является ли некоторый элемент микрорельефа поверхности выступом или впадиной. Напротив, СЗМ

регистрирует истинно трехмерные параметры. На СЗМ-изображении выступ однозначно предстает выступом, а впадина ясно видна как впадина. На получаемых при помощи оптических или электронных микроскопов изображениях, например, плоского образца, состоящего из чередующихся отражающих и поглощающих участков, могут возникать искусственные изменения контрастности. Атомно-силовой микроскоп, в свою очередь, практически безразличен к изменениям оптических или электронных свойств и дает информацию об истинной топографии поверхности.

В настоящее время в мире в широком ассортименте выпускаются СЗМ и принадлежности к ним. Среди наиболее известных фирм можно назвать Digital Instruments, Park Scientific Instruments, Omicron, Topometrix, Burleigh и др. Цены на СЗМ-устройства промышленного производства колеблются в широких пределах — от 40 тыс. долл. за простейший АСМ до 100–200 тыс. долл. и выше в зависимости от комплектации и спектра решаемых задач. Изготавливаются СЗМ также в России (фирмы Nanotechnology MDT, НТЕ) и Республике Беларусь (ИММС НАНБ).

Терминология, сложившаяся в сканирующей зондовой микроскопии, несет на себе отпечаток своего англоязычного происхождения. Для большинства терминов несложно найти русский эквивалент, однако достаточно часто можно слышать и читать, к примеру, не «острие», а «тип», не «консоль», а «кантилевер», появившиеся от непосредственного прочтения английских *tip* и *cantilever*. Некоторую неопределенность вносят в терминологию появляющиеся в последнее время новые методики. Так, фирма Digital Instruments, впервые реализовавшая в своих устройствах «режим обстукивания», зарегистрировала само название этого режима как торговую марку – Tapping Mode®. В итоге сходные режимы в СЗМ других фирм, остающиеся по сути тем же процессом, называются иначе.

Все СЗМ содержат компоненты, схематично представленные на рис. 1. В конструкции каждого сканирующего зондового микроскопа есть свои отличия. В комплекте прибора могут также присутствовать дополнительные устройства, позволяющие модифицировать базовый блок для решения специальных задач. Однако общая структура СЗМ остается более или менее одинаковой. В состав СЗМ-комплекса обычно входит компьютер, который управляет работой электромеханической части микроскопа, принимает и записывает регистрируемые зондом данные, производит на их основе построение СЗМ-изображения и, кроме того, позволяет обрабатывать полученное изображение, без чего подчас бывает трудно или вообще невозможно проанализировать наблюдаемую картину.

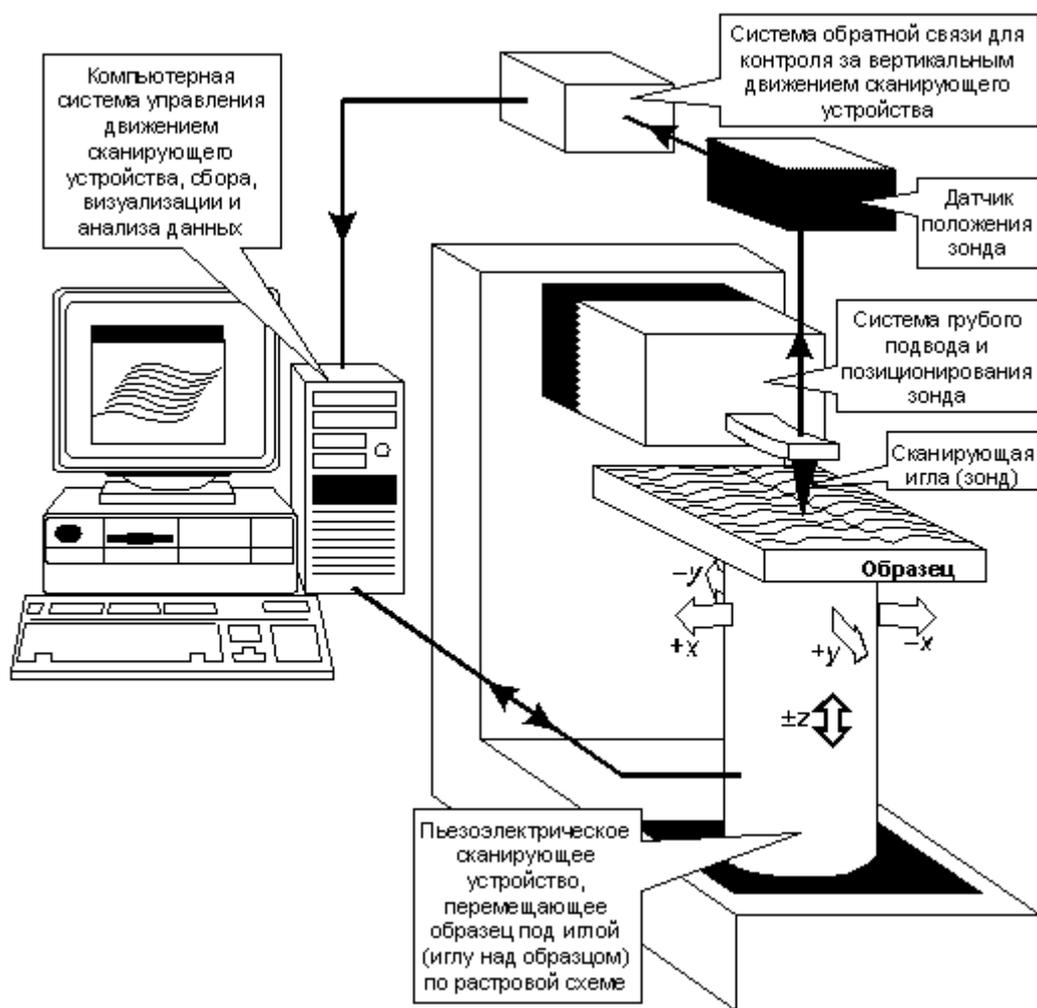


Рис 1. Общая схема сканирующего зондового микроскопа

АСМ и СТМ являются на сегодня наиболее распространенными в практике СЗМ-технологиями. Тем не менее, большинство промышленно выпускаемых устройств обычно разработаны таким образом, что для добавления к прибору новых функций и возможностей достаточно переоснастить его основной блок, заменив отдельные небольшие части. Иногда единственным необходимым изменением является переключение из одного режима в другой непосредственно в обслуживающей компьютерной программе

Сканирующий туннельный микроскоп и связанные с ним технологии
 Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) исторически является предшественником всех сканирующих зондовых микроскопов. СТМ был первым устройством, давшим реальные изображения поверхностей с атомным разрешением.

В качестве зонда в СТМ используется острая проводящая игла. Между острием иглы и образцом прикладывается рабочее напряжение, и при подводе острия к образцу примерно до 0,5–1,0 нм электроны с образца

начинают “туннелировать” через зазор к острию, или наоборот, в зависимости от полярности рабочего напряжения (рис. 2). На основании данных о токе туннелирования в СТМ проводится визуализация топографии. Чтобы происходило туннелирование, как образец, так и острие должны быть проводниками или полупроводниками. Изображений непроводящих материалов СТМ дать не может.

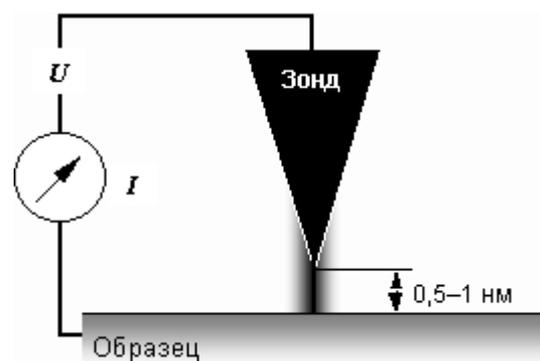


Рис. 2. Схема работы сканирующего туннельного микроскопа

Остановившись на физических принципах, положенных в основу работы СТМ, отметим, что процесс туннелирования электронов происходит при перекрытии волновых функций атомов острия сканирующей иглы и поверхности. Туннельный ток между двумя металлическими телами описывается соотношением $I = I_0 \exp[-C(jz)^{1/2}]$. При типичной высоте потенциального барьера $j = 4 \text{ эВ}$ туннельный ток снижается на порядок, если зазор z уменьшается на $0,1 \text{ нм}$. Эти свойства и являются причиной того, что острие туннельного микроскопа обычно должно находиться так близко к образцу – на расстоянии $0,5\text{--}1 \text{ нм}$. Экспоненциальная зависимость туннельного тока от расстояния придает СТМ очень высокую чувствительность: считается, что с помощью туннелирования можно измерять объекты порядка $0,001 \text{ нм}$.

Основное приложение СТМ – это измерения топографии. Именно благодаря своей чрезвычайно высокой чувствительности СТМ способен формировать изображения поверхностей с субангстремной точностью по вертикали и атомным латеральным (т.е. в горизонтальном направлении) разрешением.

Существуют два варианта конструкции СТМ в зависимости от режима сканирования образцов (рис. 3). В режиме постоянной высоты острие иглы перемещается в горизонтальной плоскости над образцом, а ток туннелирования изменяется (рис. 3а). Исходя из данных о величинах тока туннелирования, промеренных в каждой точке сканирования поверхности образца, строится образ топографии.

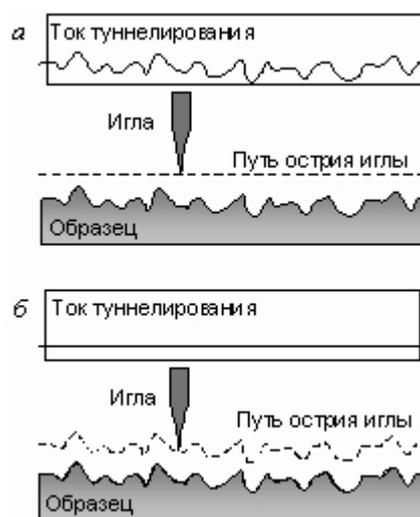


Рис. 3. Схема работы СТМ: а – в режиме постоянной высоты; б – в режиме постоянного тока

В режиме постоянного тока СТМ задействуется система обратной связи для поддержания постоянного тока туннелирования путем подстройки высоты сканирующего устройства над поверхностью в каждой точке (рис. 3б). Например, когда система детектирует увеличение туннельного тока, то она подстраивает напряжение, прикладываемое к пьезоэлектрическому сканирующему устройству, так, чтобы отвести острие дальше от образца. В режиме постоянного тока визуализация топографии осуществляется на основании данных о величине вертикальных перемещений сканирующего устройства. Если система поддерживает ток туннелирования постоянным в пределах нескольких процентов, то расстояние между острием и образцом будет постоянным с погрешностью в несколько сотых ангстрема.

У каждого режима есть преимущества и недостатки. Режим постоянной высоты более быстрый, так как системе не приходится передвигать сканирующее устройство вверх и вниз, но при этом можно получить полезную информацию только с относительно гладких поверхностей. В режиме постоянного тока можно с высокой точностью измерять нерегулярные поверхности, но измерения занимают больше времени.

Сканирующая туннельная спектроскопия (СТС) является наряду с измерениями топографии другой важной областью приложения СТМ. В первом приближении образ, составленный из значений тока туннелирования, отражает топографию поверхности образца. Если же говорить более точно, туннельный ток соответствует электронной плотности состояний поверхности. В действительности СТМ регистрирует количество заполненных или незаполненных электронных состояний вблизи поверхности Ферми в диапазоне значений энергии, определяемом прикладываемым рабочим напряжением. Можно сказать, что СТМ измеряет скорее не физическую топографию, а поверхность постоянной вероятности туннелирования.

Чувствительность СТМ к местной электронной структуре может вызвать затруднения, если необходимо картографировать топографию (т.е. получить изображение топографии). Например, если какой-то участок образца окислен, то, когда острое сканирующей иглы попадет на него, туннельный ток резко уменьшится. СТМ, работающий в режиме постоянного тока, даст команду острию приблизиться к поверхности, чтобы поддержать установленную величину тока туннелирования. В результате острие может углубиться в поверхность. В то же время, чувствительность СТМ к электронной структуре может быть огромным преимуществом. Более традиционные спектроскопические методы, такие как рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия или инверсная фотоэмиссионная спектроскопия, детектируют и усредняют данные, исходящие с относительно большой площади размерами от нескольких микрон до нескольких миллиметров в поперечнике. СТМ, наоборот, может получать спектры с площадями, сравнимых по размерам с отдельными атомами.

Электронная структура атома зависит от его разновидности (является ли он, к примеру, атомом кремния или атомом углерода), а также от его местного химического окружения (сколько вокруг него атомов, какого они типа и как симметрично распределены). Исследование зависимости сигнала СТМ от местной электронной структуры поверхности известно как сканирующая туннельная спектроскопия.

СТС охватывает ряд методов: получение топографических (в режиме постоянного тока) изображений с использованием различных рабочих напряжений и сравнение их; получение токовых изображений (в режиме постоянной высоты) при различных зазорах; варьирование рабочего напряжения при позиционировании острия над интересующим элементом топографии с одновременной регистрацией тока туннелирования.

В последнем случае получают вольт-амперные характеристики электронной структуры в данной точке. Можно настроить СТМ для снятия вольт-амперных кривых в каждой точке сканирования, создавая, таким образом, трехмерную карту электронной структуры. Используя синхронизированный усилитель, можно непосредственно получать кривые зависимостей dI/dU (проводимость) или dI/dz (рабочая функция – изменение тока при изменении зазора) от напряжения U . Все это методы зондирования местной электронной структуры поверхности с применением СТМ.

Атомно-силовой микроскоп. АСМ появились как развитие СТМ-технологии, однако заложенные в них совершенно иные принципы позволяют исследовать поверхности любых материалов – проводящих, полупроводников, а также изоляторов, т.е. непроводящих электрический ток. АСМ зондируют поверхность образца острой иглой длиной 1–2 мкм и диаметром обычно не более 10 нм. Игла устанавливается на свободном

конце измерительной консоли.

Основной принцип работы АСМ заключается в воздействии сил со стороны поверхности образца на острие сканирующей иглы. Сила, которая чаще всего ассоциируется с АСМ, – это межатомная сила, называемая также Ван-дер-Ваальсовой.

На рис. 4 схематически представлена кривая зависимости межатомной силы от расстояния между острием иглы и образцом. Правая часть кривой характеризует ситуацию, когда атомы острия и поверхности разделены большим расстоянием. По мере постепенного сближения они будут сначала слабо, а затем все сильнее притягиваться друг к другу. Сила притяжения будет возрастать до тех пор, пока атомы не сблизятся настолько, что их электронные облака начнут отталкиваться электростатически. При дальнейшем уменьшении межатомного расстояния электростатическое отталкивание экспоненциально ослабляет силу притяжения. Эти силы уравниваются при расстоянии между атомами порядка двух ангстрем, что приблизительно составляет длину химической связи. Когда суммарная межатомная сила становится положительной (отталкивающей), то это означает, что атомы вступили в контакт.

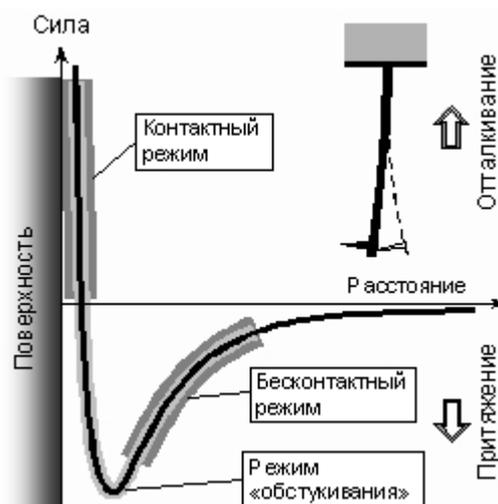


Рис. 4. Зависимость силы межатомного взаимодействия от расстояния между острием и образцом

В отношении контакта между острием сканирующей иглы и поверхностью исследуемого образца работа атомно-силового микроскопа обычно проходит в одном из режимов, соответствующим обозначенным на рис. 4 участкам кривой межатомного взаимодействия. Это контактный и бесконтактный режимы, сочетание которых дает т.н. режим «обстукивания».

При контактном режиме, известном иначе как режим отталкивания, острие сканирующей иглы АСМ приходит в мягкий «физический контакт» с

образцом. Измерительная консоль, на свободном конце которой расположена игла, обычно характеризуется низкой константой упругости, величина которой должна быть меньше, чем эффективная константа упругости, удерживающая атомы образца вместе.

Наклон кривой на графике межатомных сил в области отталкивания, или контакта, очень крутой (рис. 4). Вследствие этого отталкивающая сила уравнивает практически любую силу, которая пытается сблизить атомы друг с другом. Для АСМ это означает, что если измерительная консоль прижимает острие иглы к поверхности, то консоль скорее изогнется, чем ей удастся приблизить острие к атомам образца. Даже если изготовить очень жесткую консоль, чтобы приложить огромную силу к образцу, межатомное расстояние между острием и атомами образца уменьшится незначительно. Вероятнее всего деформируется поверхность образца.

Для контактного АСМ отталкивающая межатомная сила должна быть уравновешена другими усилиями. Это происходит благодаря наличию двух сил – капиллярной и консольной.

Капиллярная сила – это воздействие на острие сканирующей иглы со стороны тонкого слоя влаги, обычно присутствующего на поверхностях, находящихся в обычной среде. Капиллярная сила возникает, когда адсорбированная на поверхности влага приподнимается вокруг острия (рис. 5). Оказываемое на острие сильное притягивающее воздействие (около 10^{-8} Н) удерживает его в контакте с поверхностью. Величина капиллярной силы зависит от расстояния между острием и образцом.

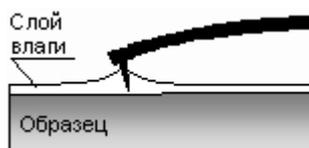


Рис. 5. Схема возникновения капиллярной силы

Ввиду того, что острие находится в контакте с образцом, капиллярная сила должна быть постоянной, поскольку расстояние между острием и образцом фактически не изменяется. Другое условие, позволяющее считать капиллярную силу постоянной, это предположение о достаточной однородности слоя влаги.

Воздействие со стороны самой измерительной консоли подобно усилию в сжатой пружине. Величина и знак (отталкивающая или притягивающая) консольной силы зависит от отклонения консоли и ее константы упругости. Сила, прилагаемая измерительной консолью контактного АСМ, в отличие от капиллярной является переменной.

Общее усилие, прикладываемое со стороны острия сканирующей иглы к

образцу, это сумма капиллярной и консольной сил. Величина суммарной силы варьируется от 10^{-8} Н (когда измерительная консоль отводится от образца почти с таким же усилием, как вода притягивает острие к его поверхности) до более типичного рабочего диапазона в пределах 10^{-7} ... 10^{-6} Н.

В бесконтактном режиме, также известном как режим притяжения, АСМ отслеживает притягивающие Ван-дер-Ваальсовы силы между острием сканирующей иглы и образцом. Зазор между острием и образцом обычно составляет 5–10 нм. На таком расстоянии электронные орбитали атомов острия сканирующей иглы начинают синхронизироваться с электронными орбиталями атомов образца. В результате возникает слабое притяжение, потому что в любой момент времени атомы острия и образца поляризованы в одном и том же направлении. В свободном пространстве эти атомы будут сближаться до тех пор, пока сильное электростатическое отталкивание, описанное выше, не станет преобладающим. Чаще всего бесконтактные АСМ конструируются для работы в динамическом режиме.

Из рис. 4 видно, что в области бесконтактной работы АСМ наклон кривой Ван-дер-Ваальсовых сил более пологий, чем в контактной. Такой пологий наклон означает меньшие отклонения измерительной консоли при реакции на изменения величины зазора между острием и образцом. Кроме того, здесь необходимо использовать более жесткую консоль, так как в противном случае острие сканирующей иглы залипнет на поверхности образца как только приблизится к ней на достаточно малое расстояние, когда начинают работать силы притяжения. Однако следует учитывать, что жесткая консоль в ответ на малые силы отклоняется меньше, чем мягкая, и поэтому для бесконтактного АСМ должна быть использована более чувствительная схема детектирования.

В бесконтактном режиме работы АСМ суммарная сила между острием и образцом небольшая – обычно $\sim 10^{-12}$ Н. Эта малая сила является преимуществом при исследовании мягких и упругих образцов. Еще одно преимущество заключается в том, что такие образцы, как, например, кремниевые подложки не загрязняются при контакте с острием.

При исследовании жестких образцов изображения, полученные в контактном и бесконтактном режимах, могут выглядеть одинаково. Однако если на поверхности жесткого образца лежат, к примеру, несколько монослоев конденсированной влаги, то эти изображения могут значительно различаться. АСМ, работающий в контакте, будет проникать через слой жидкости, отображая нижележащую поверхность, тогда как бесконтактный АСМ будет давать изображение поверхности слоя влаги (рис. 6).

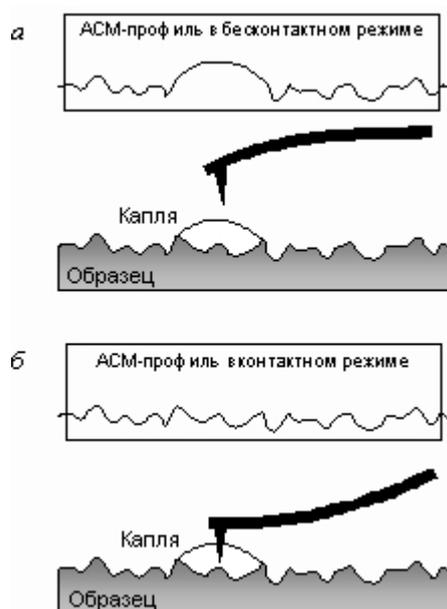


Рис. 6. АСМ-профили при наличии на поверхности влаги: а – в бесконтактном; б – контактном режиме

В отношении возбуждения вынужденных колебаний измерительной консоли АСМ различают два режима – статический и динамический. Если в измерительной консоли АСМ модулируют колебания, то такой режим называют динамическим, в противном случае – статическим.

В статическом режиме силы взаимодействия между острием иглы и поверхностью образца вызывают отклонение измерительной консоли, изгибая ее до достижения статического равновесия. В процессе сканирования образца (при движении острия над неподвижным образцом или образца под неподвижным острием) АСМ детектирует отклонения консоли, формируя набор данных о топографии одним из двух способов. В первом, называемом режимом постоянной высоты (его другое название – режим переменного отклонения), данные об изменениях положения консоли в пространстве могут быть непосредственно использованы для формирования образа топографии. Под постоянной высотой здесь подразумевается неизменность расстояния между зондирующим узлом и образцом. Режим постоянной высоты часто используется для получения изображений атомно плоских поверхностей в атомном масштабе, где отклонения консоли и, следовательно, изменения прикладываемой силы всегда будут малыми. Режим постоянной высоты также важен для визуализации в реальном масштабе времени изменяющихся поверхностей, когда нельзя пренебречь высокой скоростью сканирования. Аналогичный метод построения изображений с таким же названием существует и у СТМ.

В другом методе, который называют режимом постоянной силы, отклонение измерительной консоли используется в качестве входного параметра для системы обратной связи, которая поддерживает величину

этого отклонения постоянной. В данном случае сканирующее устройство передвигается вверх и вниз по оси z в соответствии с текущими условиями микрорельефа поверхности образца, и на основании данных об этих перемещениях формируется изображение топографии. Режим постоянной силы обычно наиболее предпочтителен в большинстве приложений: хотя скорость сканирования здесь ограничена скоростью реакции системы обратной связи, но общее воздействие, оказываемое на образец острием сканирующей иглы, хорошо контролируется. Действительно, при поддержании постоянного отклонения консоли суммарная сила, прикладываемая к образцу, остается постоянной. Изображения, полученные в режиме постоянной силы, обычно достаточно легко интерпретировать как образы топографии. Если проводить аналогию с СТМ, то подобным здесь будет режим постоянного тока.

В динамическом режиме система АСМ модулирует механические колебания измерительной консоли на частоте, близкой к резонансной (типичные значения находятся в пределах от 30 до 300 кГц), с амплитудой в несколько нанометров. Величина самой резонансной частоты зависит от прикладываемой внешней силы, и поэтому в процессе приближения острия сканирующей иглы к поверхности образца она изменяется, поскольку при этом изменяется и величина Ван-дер-Ваальсовой силы (рис. 4). Отталкивающая сила стабилизирует упругую реакцию консоли и увеличивает резонансную частоту, тогда как при воздействии притягивающей силы наблюдается обратная картина.

В процессе сканирования образца в динамическом режиме система обратной связи АСМ передвигает сканирующее устройство вверх и вниз, сохраняя либо амплитуду, либо резонансную частоту измерительной консоли постоянной, что позволяет поддерживать постоянным и среднее расстояние между острием и образцом. Как и при работе в статическом режиме постоянной силы, данные о перемещениях сканирующего устройства используются для визуализации топографии. При таком методе измеряется и визуализируется поверхность постоянного градиента сил. В качестве альтернативного метода можно получать образы поверхности переменного градиента сил, для чего необходимо просто отключить систему обратной связи. Подобно статическому режиму эти два метода обеспечивают, соответственно, легкость восприятия АСМ-изображения и высокую скорость сканирования. Чувствительность схемы детектирования в динамическом режиме обеспечивает субангстремное вертикальное разрешение на изображениях.

Для получения изображений поверхности образца можно использовать не только данные о перемещении сканирующего устройства (т.н. «запись по высоте»), но и об изменении в процессе сканирования амплитуды или частоты колебаний консоли. В случае «записи по амплитуде» или «по частоте» появляется возможность визуализировать распределение

механических свойств по поверхности образца, что дает не менее ценную информацию, чем данные о его топографии.

В таблице дается сравнение основных режимов работы АСМ в их различных комбинациях.

Режимы работы атомно-силового микроскопа

		Статический	Динамический
Контактный	+	Высокое латеральное разрешение. Возможность определять деформацию в системе острие – поверхность.	Возможность определять площадь контакта или модуль упругости. Высокое силовое разрешение (~0.001 нН). Незначительный температурный дрейф.
	–	Возможно повреждение поверхности. Низкое силовое разрешение (~1 нН). Подверженность температурному дрейфу.	Возможно повреждение поверхности. Модуляция нарушает адгезионное взаимодействие между острием и поверхностью.
Бесконтактный	+	Работа без повреждения поверхности.	Работа без повреждения поверхности. Высокое силовое разрешение. Незначительный температурный дрейф.>
	–	Низкое силовое и пространственное разрешение. Подверженность температурному дрейфу.	Низкое пространственное разрешение (~10 нм).

Качество результатов, которые можно получить на бесконтактном АСМ, в значительной мере зависит от использования качественной измерительной консоли и сканирующей иглы. Измерительная консоль для бесконтактного режима, как отмечалось, должна быть значительно жестче, чем консоль для контактного АСМ, чтобы в процессе своих осцилляций (колебаний) она случайно не коснулась поверхности. Более того, острая игла для бесконтактного АСМ даже более важна, чем для контактного: при работе в бесконтактном режиме наклон кривой Ван-дер-Ваальсовых сил пологий, поэтому с поверхностью образца будет взаимодействовать большее количество атомов острия.

Режим «обстукивания» по сути является реализацией контактного АСМ в

динамическом режиме, образ действия которого подобен бесконтактному. В режиме «обстукивания» измерительная консоль колеблется на своей резонансной частоте с высокой амплитудой порядка 100 нм. При каждом колебании острие касается образца в своей нижней точке (отсюда термин режим «обстукивания»). При работе в режиме «обстукивания» повреждение образца менее вероятно, чем в контактном, поскольку в процессе перехода к каждой последующей точке сканирования устраняются боковые (латеральные) силы (трение или протягивание) между образцом и острием. Однако вертикальные силы в режиме «обстукивания» должны быть значительно выше, чем капиллярная сила (10^{-8} Н), для того чтобы дать острию сканирующей иглы возможность проникать внутрь и выходить из водного слоя без задержки. Эта вертикальная сила достаточно велика, чтобы деформировать поверхность мягких и упругих материалов. Поэтому изображения, полученные в режиме «обстукивания», часто представляют собой смесь топографии и упругих свойств поверхности образца.

Аналогом сканирующей туннельной спектроскопии для АСМ является возможность снимать кривые зависимости силы взаимодействия зонда с поверхностью образца от расстояния между ними — кривые подвода/отвода. Эти кривые важны для измерения вертикальной силы, прикладываемой к поверхности со стороны острия в процессе сканирования. Кроме того, анализируя изменения формы этой кривой, можно оценивать вязкость загрязнений поверхности, толщину слоя смазки, а также местные вариации упругих свойств поверхности.

Кривая подвода/отвода представляет собой график зависимости отклонения измерительной консоли от удлинения сканирующего устройства. Ван-дер-Ваальсовы силы (рис. 4) представляют только одну составляющую, воздействующую на отклонение консоли: на измерения будут дополнительно влиять тонкий слой влаги, обычно присутствующий при работе АСМ на открытом воздухе, а также смазки и загрязнения.

Кривые подвода/отвода, получаемые в лаборатории, достаточно сложны и специфичны для каждого конкретного образца, однако для них можно выделить общие характерные участки, схематично изображенные на рис. 7.

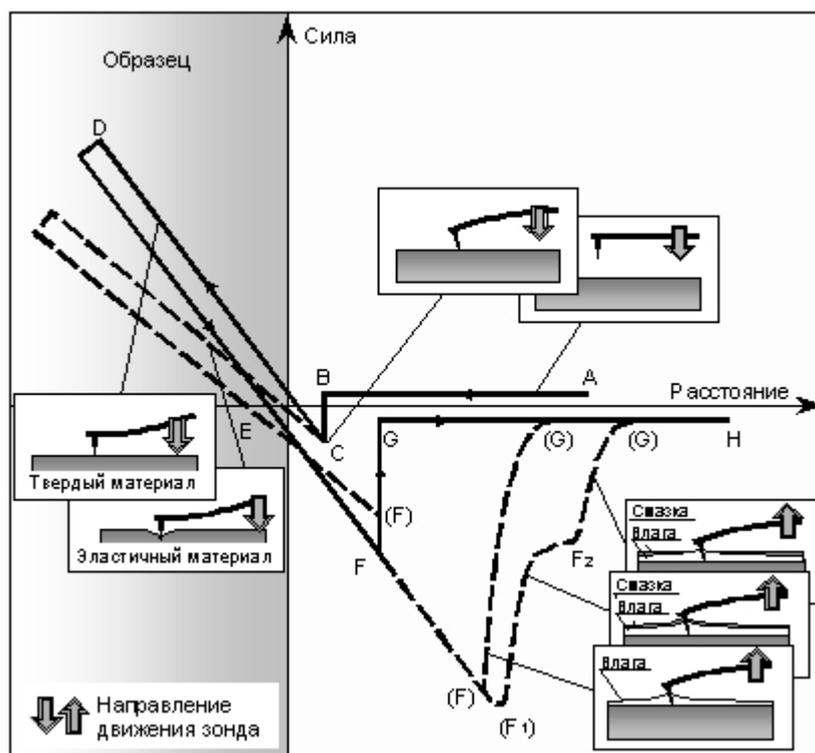


Рис. 7. Номограмма кривых подвода/отвода. Сплошной линией схематически показана кривая, получаемая в вакууме. Пунктирными линиями отмечены вариации кривой подвода/отвода, обусловленные упругими свойствами образца и присутствием на поверхности слоя адсорбированной влаги и смазки (загрязнений)

Участок А–В. В левой части кривой сканирующее устройство полностью отведено, и консоль не изгибается, поскольку острие не касается образца. При подводе зонда к поверхности консоль продолжает оставаться неизогнутой до тех пор, пока острие не приблизится к поверхности образца настолько, чтобы на него начала действовать притягивающая Ван-дер-Ваальсова сила (т. В). На этом участке кривая не содержит никакой полезной информации.

Участок В–С. В точке В консоль внезапно изгибается по направлению к поверхности, и игла касается поверхности (т. С). Этот участок известен как «скачок к контакту». При работе в воздушной среде кроме притягивающей Ван-дер-Ваальсовой и электростатической сил на острие будет дополнительно воздействовать капиллярная составляющая со стороны адсорбированного слоя влаги, а также загрязнений или смазки. Изменение величины силы на участке В–С кривой может быть пересчитано в смещение острия иглы по закону Гука ($F = -kx$), что позволяет оценить толщину адсорбированного на поверхности слоя.

Участок С–D. Этот участок характеризует дальнейший подвод зонда к образцу, сопровождающийся прижатием острия иглы к поверхности и почти линейным изгибом измерительной консоли в направлении от поверхности. По конфигурации участка С–D можно судить о модуле

упругости системы «зонд–поверхность». В случае, если измерительная консоль намного мягче поверхности образца, как, например, в случае неразрушающего сканирования, наклон кривой большей частью отражает величину константы упругости самой консоли. Однако, когда жесткость консоли намного больше жесткости поверхности, наклон участка С–D позволяет исследовать упругие свойства образца. Участок С–D не обязательно должен быть прямой линией: изменения наклона в пределах этого сегмента кривой указывают на различие в реакции поверхности на различную прикладываемую силу. Это может происходить по причине перехода от упругой к пластической деформации, различия в поверхностных и объемных свойствах, а также изменения в составе образца по глубине.

Участок D–E. Точка D соответствует завершению фазы подвода и началу отвода зонда от поверхности. При отсутствии гистерезиса сканирующего устройства сегмент D–E практически повторяет участок С–D кривой, полученный при подводе. Если оба эти участка прямые и параллельны друг другу, то дополнительной информации (кроме отмеченной выше) они не содержат. В случае их непараллельности различие между ними дает возможность оценить либо пластическую, либо упругую деформацию образца (если скорость восстановления его геометрических размеров меньше скорости отвода зонда).

Участок E–F. Точка E соответствует нейтральному отклонению консоли. При дальнейшем отводе зонда от поверхности консоль начинает изгибаться в направлении к образцу, поскольку на острие воздействует притягивающая, или адгезионная сила. На конфигурацию участка E–F влияет наличие на поверхности адсорбированных слоев. В случае работы в вакууме на острие иглы воздействуют Ван-дер-Ваальсова и, возможно, электростатическая силы. Если же снятие кривых происходит на воздухе, то к ним обычно добавляется достаточно мощная капиллярная сила со стороны слоя влаги, смазки или загрязнений. Толщина приповерхностного слоя влияет на длину участка E–F, а его наклон, отличающийся от наклона участка, соответствующего реакции жесткого образца, будет указывать на поднятие адсорбированных слоев вслед за отводимым зондом.

Участок F–G. Когда упругая реакция консоли превосходит притягивающую силу со стороны поверхности и находящихся на ней слоев, зонд отрывается от образца. На кривой подвода/отвода этому соответствует точка F, известная под названием точки отрыва. Величина усилия в точке F равна максимальной общей адгезионной силе между зондом и образцом и представляет ключевую информацию при исследованиях адгезии. Если слой влаги дополнительно покрыт слоем смазки или загрязнений, то можно наблюдать не одну точку отрыва (Рис. 7, тт. F_1 и F_2). Положение точек F_1 и F_2 зависит от вязкости и толщины этих слоев. Переход между участками E–F и F–G не обязательно представляет собой резкий скачок. Если

адсорбционный слой достаточно вязкий, то зонд может отходить от поверхности постепенно, а переход E–F – F–G будет иметь в этом случае скругленные очертания.

Латерально-силовой микроскоп. (ЛСМ) – это контактный АСМ, отображающий латеральные (т.е. боковые) отклонения измерительной консоли (закручивание), которые возникают в ней в плоскости параллельной поверхности образца. С помощью ЛСМ возможна визуализация изменений поверхностного трения, являющихся результатом неомогенности материала поверхности, а также для получения контрастных изображений любых поверхностей.

С созданием ЛСМ связано возникновение такой области исследований, как нанотрибология: эта технология предоставляет исключительную возможность исследовать процессы трения и изнашивания на молекулярном уровне при взаимодействии как отдельных выступов микрорельефа, так и отдельных атомов или молекул.

Как показано на рис. 8, латеральные отклонения консоли обычно возникают по двум причинам: изменение наклона поверхности и изменение ее фрикционных параметров (коэффициента трения). В первом случае консоль может закручиваться, когда ей попадает постепенный наклон. Во втором случае сканирующая игла, пересекая некоторый участок, может испытать большее трение, вызывая тем самым и большее закручивание измерительной консоли. Чтобы разделить эти два эффекта, ЛСМ должен уметь одновременно считывать данные о латеральном и вертикальном отклонении (т.е. визуализировать топографию).

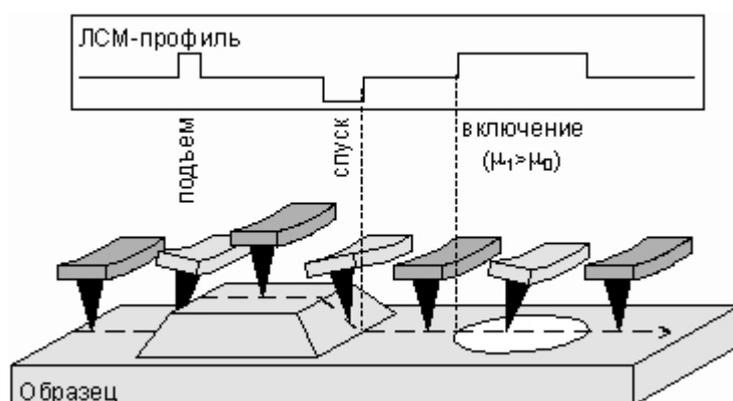


Рис. 8. Элементы ЛСМ- профиля образца, отражающие прохождение сканирующей иглой участков с измененным наклоном поверхности и с отличающимся коэффициентом трения m_1

Магнитно-силовой микроскоп (МСМ) отображает пространственные вариации магнитных сил на поверхности образца. Особенностью конструкции МСМ является то, что острие сканирующей иглы покрывается тонкой ферромагнитной пленкой (рис. 9). МСМ работает в бесконтактном

режиме и детектирует изменения в резонансной частоте измерительной консоли, обусловленные изменениями магнитного поля в зазоре между острием сканирующей иглы и образцом. МСМ может визуализировать естественно встречающиеся и свободно записанные доменные структуры в магнитных материалах.

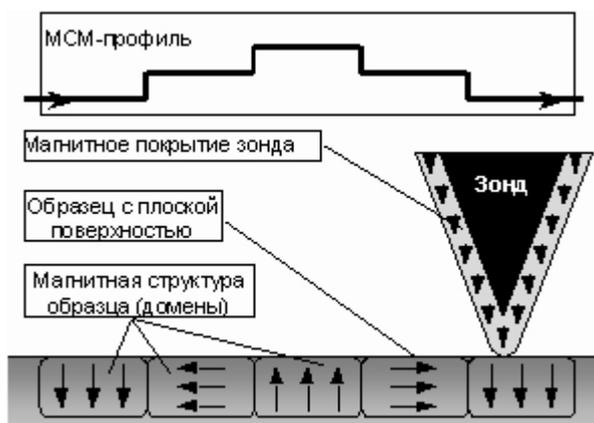


Рис. 9. Схема работы магнитно-силового микроскопа. МСМ-профиль отображает магнитную структуру поверхностного слоя образца

Изображения, полученные с помощью МСМ, содержат информацию как о топографии, так и о магнитных свойствах поверхности. Какая информация преобладает на изображении, зависит от величины расстояния между острием и поверхностью, потому что межатомная магнитная сила существует при больших зазорах, чем это наблюдается для Ван-дер-Ваальсовой силы. Если острие находится близко к поверхности (<10 нм), то в режиме работы стандартного бесконтактного АСМ на изображении будет отражена преимущественно топография. При увеличении зазора между острием и образцом (примерно до 30–300 нм) влияние топографии снижается, и становятся видны магнитные эффекты. Анализируя ряд изображений, полученных при различной высоте острия над поверхностью, можно успешно отделить магнитные эффекты от влияния топографии. Подобное поведение характерно также и для электростатических сил.

В **электростатическом силовом микроскопе (ЭСМ)** напряжение прикладывается между острием и образцом, в то время как измерительная консоль движется над поверхностью, не касаясь ее. Консоль отклоняется, когда попадает на статически заряженные области (рис. 10). Величина этого отклонения пропорциональна плотности заряда и может быть измерена стандартной системой. ЭСМ применяется для исследования распределения поверхностной плотности носителей заряда.

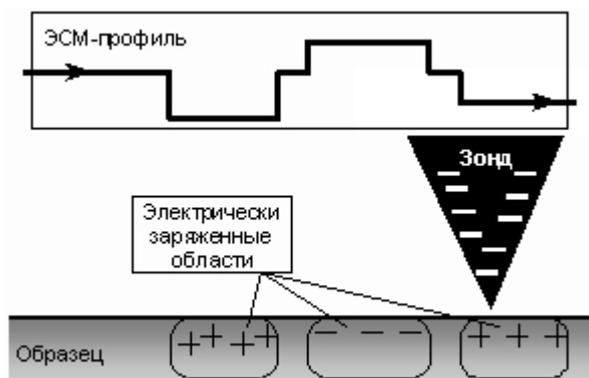


Рис. 10. Картографирование электростатических полей с помощью ЭСМ

Методы микроскопии поверхностных свойств используют возможность отслеживания и регистрации амплитуды и частоты колебаний зонда (измерительной консоли) в процессе сканирования. Устройства, реализующие такие методики, представляют собой АСМ, в конструкции которого предусмотрена возможность модуляции вынужденных колебаний в зонде или образце. Эти методы обычно позволяют одновременно с получением изображений топографии также регистрировать изменения механических свойств поверхности образца.

На рис. 11а представлен вариант, когда АСМ работает в контактном режиме, и в измерительной консоли возбуждаются колебания с постоянной амплитудой A . С помощью системы обратной связи отклонение консоли поддерживается постоянным; частота ее колебаний изменяется в соответствии с жесткостью сканируемого участка поверхности. Таким образом можно, например, выявлять разнородные включения в материале поверхности.

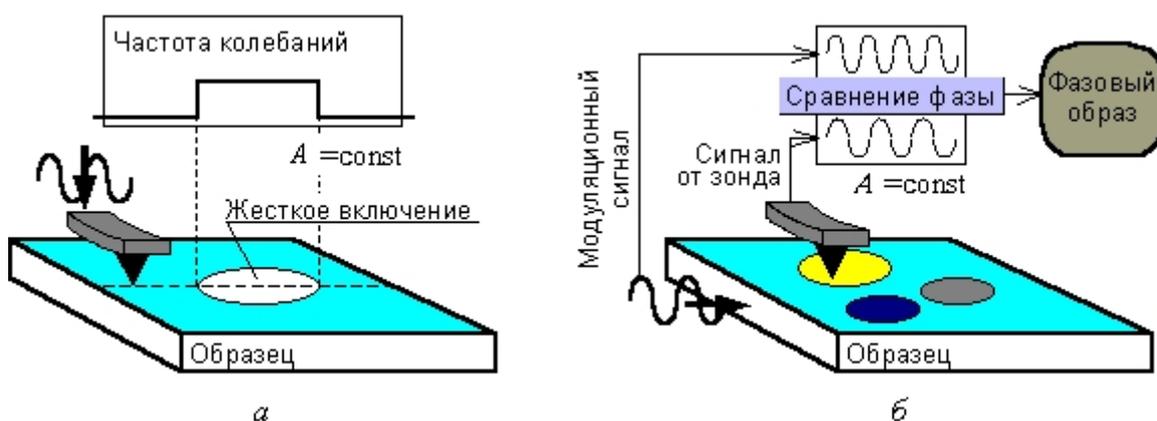


Рис. 11. Визуализация механических свойств поверхности: а – при отслеживании частоты колебаний зонда (частота увеличивается на более жестких участках); б – при записи разности фаз частоты сигнала, прикладываемого для возбуждения колебаний, и частоты колебаний зонда (построение фазового образа)

Аналогично, при поддержании постоянной частоты колебаний консоли и

регистрации изменений их амплитуды возможна визуализация распределения вязких характеристик поверхности. При этом на более вязких участках амплитуда будет меньше.

Механические свойства поверхности можно исследовать также путем построения ее фазового образа (рис. 11б). Для этого необходим АСМ, работающий в динамическом режиме. Как и в предыдущих случаях, в измерительной консоли или образце модулируются вынужденные колебания. Система при этом сравнивает реальную частоту колебаний консоли с частотой сигнала, прикладываемого для возбуждения колебаний. Изменения в сдвиге фаз между этими двумя сигналами будет отражать изменения механических свойств поверхности образца.

С помощью **сканирующей термальной микроскопии (СТерМ)** можно визуализировать локальные вариации теплофизических параметров поверхностей. Данная методика реализуется за счет использования терморезистивного зонда, работающего в одном из двух режимов — постоянного тока или постоянной температуры.

В первом случае электрическое сопротивление термочувствительного зонда изменяется вместе с изменением температуры в данной точке сканирования. Это регистрируется путем измерения падения напряжения при пропускании через зонд слабого постоянного тока, исключаяющего, однако, его нагрев. При такой схеме работы картографируются температурные поля на сканируемой поверхности.

В режиме постоянной температуры отслеживается тепловой поток от зонда к образцу при поддержании постоянной температуры зонда, что позволяет визуализировать локальные изменения теплопроводности поверхности образца. Набор данных составляется из значений напряжения, прикладываемого к зонду для его обогрева и изменяющегося в каждой точке сканирования в зависимости от теплопроводности материала образца.

Близкопольная сканирующая оптическая микроскопия (БСОМ) является особой разновидностью сканирующей зондовой технологии, в которой используется видимый свет. Другое название этой методики — сканирующая световая микроскопия. Традиционно разрешение оптических микроскопов ограничено длиной волны света — примерно половиной микрона. БСОМ улучшает разрешение оптического микроскопа на порядок.

Зондом в БСОМ является «световая воронка», которой сканируют образец. Видимый свет исходит из узкого конца световой воронки диаметром 10–30 нм и попадает на детектор либо после отражения от образца, либо пройдя сквозь него. Интенсивность оптического сигнала регистрируется детектором в каждой точке измерений, а набор данных, считанных со всей сканируемой поверхности, составляет БСОМ-образ. С помощью БСОМ

можно формировать изображение поверхности в видимом свете с разрешением около 15 нм при условии, что расстояние между источником света и образцом очень мало – ~ 5 нм.

Световая воронка и система поддержания постоянного расстояния между источником света и образцом – это две достаточно «тонкие» части БСОМ. Обычно световая воронка изготавливается нагреванием оптического волокна, протяжкой его до малого диаметра с проследующим скалыванием с одного конца. После этого на волокно для лучшей светопроводимости наносят слой металла (металлизируют). Другой способ изготовления световой воронки предусматривает высверливание небольшого отверстия в острие пустотелой сканирующей иглы АСМ и направление внутрь ее света. Разработка эффективной световой воронки в настоящее время является областью активных исследований.

БСОМ должен поддерживать расстояние между острием сканирующей иглы и образцом постоянным, чтобы получить простое оптическое изображение поверхности. Для этого могут быть использованы традиционные для АСМ методики поддержания постоянного отклонения измерительной консоли.

Сравнение СЗМ и РЭМ. В сравнении с растровым электронным микроскопом (РЭМ) атомно-силовой микроскоп обладает рядом преимуществ. Так, в отличие от РЭМ, который даёт псевдо трёхмерное изображение поверхности образца, АСМ позволяет получить истинно трёхмерный рельеф поверхности. Кроме того, непроводящая поверхность, рассматриваемая с помощью АСМ, не требует нанесения проводящего металлического покрытия, которое часто приводит к заметной деформации поверхности. Для нормальной работы РЭМ требуется вакуум, в то время как большинство режимов АСМ могут быть реализованы на воздухе или даже в жидкости. Данное обстоятельство открывает возможность изучения биомакромолекул и живых клеток. В принципе, АСМ способен дать более высокое разрешение чем РЭМ. Так было показано, что АСМ в состоянии обеспечить реальное атомное разрешение в условиях сверхвысокого вакуума. Сверхвысоковакуумный АСМ по разрешению сравним со сканирующим туннельным микроскопом и просвечивающим электронным микроскопом.

К недостатку АСМ при его сравнении с РЭМ также следует отнести небольшой размер поля сканирования. РЭМ в состоянии просканировать область поверхности размером в несколько миллиметров в латеральной плоскости с перепадом высот в несколько миллиметров в вертикальной плоскости. У АСМ максимальный перепад высот составляет несколько микрон, а максимальное поле сканирования в лучшем случае порядка 150×150 микрон². Другая проблема заключается в том, что при высоком разрешении качество изображения определяется радиусом кривизны

кончика зонда, что при неправильном выборе зонда приводит к появлению артефактов на получаемом изображении.

Обычный АСМ не в состоянии сканировать изображения так же быстро, как это делает РЭМ. Для получения АСМ-скана, как правило, требуется несколько минут, в то время как РЭМ после откачки способен работать практически в реальном масштабе времени, хотя и с относительно невысоким качеством. Достаточно медленная скорость развёртки АСМ часто приводит к появлению на изображении искажений, вызываемых тепловым дрейфом, ограничивая тем самым возможности микроскопа при точном измерении элементов сканируемого рельефа. Однако несколько быстродействующих конструкций было предложено, чтобы увеличить производительность сканирования микроскопа, включая зондовый микроскоп, который был впоследствии назван видеоАСМ (удовлетворительного качества изображения были получены на видеоАСМ с частотой телевизионной развёртки, т.е. быстрее, чем на обычном РЭМ). Для коррекции искажений от термодрейфа было также предложено несколько методов.

Изображения, полученные на АСМ, могут быть искажены гистерезисом пьезокерамического материала сканера, а также перекрёстными паразитными связями, действующими между x , y , z элементами сканера, что может потребовать программной коррекции. Современные АСМ используют программное обеспечение, которое вносит исправления в реальном масштабе времени (например, особенность-ориентированное сканирование, особенность-ориентированное позиционирование), либо сканеры, снабжённые замкнутыми следящими системами, которые практически устраняют данные проблемы. Некоторые АСМ вместо пьезотрубки используют x , y , z элементы сканера механически несвязанные друг с другом, что также позволяет исключить часть паразитных связей. АСМ можно использовать для определения типа атома в кристаллической решётке

Манипулятор АСМ и СТМ позволяет при габаритах в несколько сантиметров передвигать иглу с разрешением лучше $0,1 \text{ \AA}$. Коэффициент температурного расширения большинства материалов около 10^{-6} . При размерах манипулятора в несколько сантиметров изменение температуры на $0,01^\circ$ приводит к перемещению иглы вследствие теплового дрейфа на 1 \AA .

Одной из эффектных СЗМ-технологий является **нанолиитография**. Обычно СЗМ применяются для формирования изображения поверхности без ее повреждения. Однако АСМ или СТМ могут быть использованы для направленной модификации поверхности путем приложения либо повышенной нагрузки в случае АСМ, либо повышенных пульсаций тока в случае СТМ. Эта технология известна как нанолиитография. Примеры

поверхностей, которые были с помощью подобных методик модифицированы атом за атомом, появлялись не только в научной литературе, но также в газетах и популярных журналах. Большинство СТМ могут быть использованы и для нанолитографии, если они содержат устройства для генерации повышенных пульсаций тока. В случае АСМ необходимо, чтобы он имел возможность работать в контактном режиме. Кроме того, необходимым условием является контролируемое перемещения острия зонда по схеме, задаваемой оператором.

В Технологическом Институте Джорджии (Georgia Institute of Technology) разработана новую технику «быстрой» нанолитографии, которой не требуется вакуум. То есть нанесение литографических изображений может проводиться в воздушной и даже жидкой среде. Как говорят ученые, это исследование имеет очень широкий спектр применения: от электроники до биотехнологий и наножидкостных систем.

В основе новой техники лежит метод термохимической нанолитографии (Thermochemical nanolithography — TCNL). Роль иглы выполняет кремниевый зонд атомно-силового микроскопа (АСМ), который, разогреваясь до необходимой температуры, проходит по поверхности тонкой полимерной пленки. Тепло зонда вызывает химическую реакцию, изменяющую химические свойства пленки таким образом, что прочерченная зондом дорожка становится из гидрофобной гидрофильной. После этого на дорожку ученые могут прикрепить ионы металлов или другие химические вещества.

Удобство метода заключается в высокой скорости нанесения дорожек с помощью зонда микроскопа. Так, она достигает миллиметров в секунду. Это на порядки больше современной нанолитографии глубокого пера (dip-pen nanolithography — DPN), скорость нанесения дорожек в которой составляет 0.0001 миллиметра в секунду. Как говорят исследователи, предельное разрешение термохимической нанолитографии (TCNL) – около 12 нанометров. При этом нанесение рисунка возможно как в воздушной, так и в жидкой среде, что меняет представление об этой технологии вообще, так как для традиционной нанолитографии нужен вакуум.

Также благодаря усилиям компании IBM, создавшей зонд для АСМ со множеством рабочих перьев, ученые могут наносить параллельно несколько дорожек. Исследователи из Университета Иллинойса ранее разработали чудо-зонд, с помощью которого стал возможен метод TCNL. Зонд разогревается до температуры выше 1000 °С, при этом он так же быстро остывает. Количество циклов нагревания/остывания может доходить до одного миллиона раз в секунду. Как говорят ученые, это самый маленький в мире управляемый источник тепла. Быстрота же метода достигается за счет того, что перо не формирует из дополнительного материала дорожки, а они наносятся после в жидком растворе. Также

полимер, на котором наносится изображение далеко не прост – его специально разрабатывали ученые из Технической Школы Химии и Биохимии (Tech's School of Chemistry and Biochemistry).

Благодаря всем вышеперечисленным особенностям термохимической нанолитографии, ученые уверенно говорят о ее будущем широком применении в промышленности и коммерческих продуктах.

В заключение, комментируя **возможность элементного распознавания атомов**, необходимо отметить, что в настоящее время никакая технология СЗМ не может позволить определить тип атома или молекулы при отсутствии другой информации. Тем не менее, с помощью СЗМ можно проводить ограниченную идентификацию материалов. Выше уже обсуждалось использование для этих целей данных об электронной структуре. Кроме того, сегодня реальностью является картографирование жесткости и вязкости поверхностей с использованием модуляционных силовых методов. С помощью ЛСМ можно также попытаться идентифицировать материалы, основываясь на различиях в их фрикционных свойствах. Например, сила трения острия сканирующей иглы по полимерной матрице и материалу заключенного в ней наполнителя будет различной. Чтобы классифицировать материалы, взяв за критерий упругие свойства, необходимо снимать кривые подвода/отвода на элементах АСМ-изображения. Наконец, притягивающее Ван-дер-Ваальсово взаимодействие, используемое в бесконтактном АСМ, может оказаться чувствительным к типам атомов – ведь пределы чувствительности материалов не изучены пока что достаточно глубоко

Иной способ манипулировать отдельными атомами, ионами и электронами разработали Ханс Георг Демельт и Вольфганг Пауль

Ханс Георг Демельт — немецко-американский физик, родился 9 сентября 1922 года в г. Гёрлиц, Германия. Лауреат Нобелевской премии по физике 1989 года — половина премии совместно с *Вольфгангом Паулем* «за разработку метода удержания одиночных ионов». Вторую половину премии получил *Норман Рамзей* «за изобретение метода отдельных колебательных полей и его использование в водородном лазере и других атомных часах».  Ханс Георг Демельт вырос в Берлине. После экзамена на допуск к обучению в университете (Abitur) в 1940 году пошёл служить в армию в части ПВО. Участвовал в Сталинградской битве, после которой вернулся в Германию и в рамках военной программы изучал физику в университете Бреслау. В 1944 году был послан на западный фронт, где во время Арденнской битвы попал в плен к американцам. После освобождения в 1946 году продолжил обучение в Гёттингенском университете в том числе и у таких учёных, как *Рихард Беккер*, *Ханс Копферман*, *Вернер Гейзенберг*, *Макс фон Лауэ*, *Вольфганг Пауль* и *Макс Планк*. При похоронах Планка был одним из несущих его гроб. Получил диплом в 1948 году по теме томсоновского масс-спектрометра. В 1950 году защитил

диссертацию, после чего был приглашён в США на место постдока. В 1952 году перешёл в Вашингтонский университет в Сиэттле, где в 1955 году стал ассистентом профессора, в 1958 году заместителем профессора и в 1961 году профессором. В 2002 году вышел на пенсию. Демельт был женат на Ирмагд Лассов. У них родился сын Герд. После смерти жены второй раз женился на Диане Дундор. В 1961 году принял американское гражданство.

В 1956 году Демельт впервые описал преимущества ионных ловушек для спектроскопии высокой разрешающей силы. В последующие годы он заложил основы для строительства таких ловушек. В 1959 году ему удалось продержат в магнетронной ловушке (впоследствии названной ловушкой Пеннинга) одиночный электрон в течение 10 секунд. В 1973 году ему удалось произвести длительное хранение одного электрона и построить одноэлектронный генератор, совместно с Дэвидом Винеландом и Филом Экстромом. В последующие годы он настолько усовершенствовал этот метод, что в 1987 году ему удалось очень точно измерить гирромагнитное отношение электрона и позитрона. Частицам, удерживаемым в ловушках более месяца, Демельт давал шуточные имена.

В 1989 году Демельт, совместно с Вольфгангом Паулем, получил Нобелевскую премию по физике. Премия Румфорда Американской академии наук и искусств 1985 года. Национальная медаль науки Национального научного фонда США 1995 года.

Вольфганг Пауль (*Wolfgang Paul*) (10 августа 1913, Лоренцирх - 7 декабря 1993, Бонн, ФРГ) - немецкий физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1989 года. После защиты диссертации в 1939 году в Берлине, Пауль защищает вторую диссертацию в Гёттингене и работает там профессором с 1944 по 1952 год. В 1952 году он переходит в Боннский университет, где работает до 1981 года профессором и директором физического института. С 1964 по 1967 год Пауль был директором физического отделения в ЦЕРНЕ, в 1970-1973 годах - председателем совета директоров ускорителя DESY в Гамбурге. В 1979 году Пауль был избран президентом фонда имени Александра фон Гумбольдта и находился на этом посту в течение 10 лет.

Вольфганг Пауль считается пионером в ряде разделов экспериментальной физики элементарных частиц. Его работы охватывают также области атомной и молекулярной физики, масс-спектроскопии, разделения изотопов, рассеяния электронов в веществе, радиобиологии, дозиметрии и медицинской терапии электронными пучками. В 1953 году Пауль разработал квадрупольный масс-фильтр (массфильтр Пауля) для применения в масс-спектроскопических измерениях, который в дальнейшем в измененном виде применялся в ионных ловушках различных конструкций. В 1989 году Пауль был удостоен Нобелевской премии по физике совместно с Хансом Демелтом «за разработку метода удержания одиночных ионов». Среди прочих наград: степень почётного доктора в университетах Упсалы, Аахена, Познани,

Салоников, Кентербери. Пауль был вице-канцлером ордена Pour le Mérite. Он получил также золотую медаль академии наук в Праге, медаль Дирака от университета Нового Южного Уэльса. Пауль награжден орденом ФРГ за заслуги (большой крест со звездой). От немецкого физического общества Пауль получил премию имени Роберта Поля.

Именем Вольфганга Пауля названа премия немецкого масс-спектроскопического общества (Исследовательская премия имени Вольфганга Пауля), а также премия Вольфганга Пауля, присуждаемая фондом Александра фон Гумбольдта и федеральным министерством образования и исследований и являющаяся одной из самых больших по сумме за всю историю науки Германии. В честь Пауля названа большая лекционная аудитория в университете Бонна

В первом браке с Лизелотой Пауль (урождённая Хирше) у него было четверо детей - Ютта, Регине, Штефан и Лоренц. С 1979 года Пауль был женат на доцентке по средневековой литературе Дорис Вальх-Пауль. Сын Пауля - Штефан Пауль заведует кафедрой экспериментальной физики в техническом университете Мюнхена, другой сын - Лоренц Пауль является профессором физики в университете Вупперталя

Норман Фостер Рамзей (*Norman Foster Ramsey*)— американский физик родился 27 августа 1915 года в Вашингтоне, лауреат Нобелевской премии по физике 1989 года «за изобретение метода раздельных колебательных полей и его использование в водородном мазере и других атомных часах».

Рамзей обучался в Колумбийском университете (США). Получил степень бакалавра в 1935 году и степень доктора в 1940 году. Он оставался в Колумбийском университете до 1947 года, после чего переехал в Гарвард. Будучи профессором по физике в Гарвардском университете с 1947 года, Рамзей также занимал различные посты как в государственных, так и в международных агентствах — таких как НАТО и комиссия по атомной энергии США. Член правления советников организации учёных и инженеров США.

Присуждение Нобелевской премии Г. Демельту и В. Паулю свидетельствует о том, что Шведская Королевская академия помнит известное высказывание Георга Кристофа Лихтенберга: «Я считаю, что самая печальная ситуация во всей химии заключается в невозможности свободно подвесить мельчайшие частицы материи». Нобелевским лауреатам 1989 года удалось именно подвесить отдельные атомные и ядерные частицы, как заряженные, так и нейтральные, в магнитных и электрических полях, удерживая их в течение достаточно долгого времени, с тем, чтобы с предельной точностью исследовать их свойства. (В соответствии с соотношением неопределенностей, чем выше точность измерения, тем больший отрезок времени оно занимает). Возможность работать с отдельными частицами

позволило реализовать новый тип атомных экспериментов. Обычные измерения вероятностей переходов проводятся на ансамблях частиц и, тем самым, содержат статистическое усреднение по многим частицам, тогда как плененный в ловушке отдельный атом позволяет исследовать его взаимодействие с полем излучения, его собственные квантовомеханические свойства.

Идея построения ловушек возникла в физике молекулярных пучков, масс-спектропии и физике ускорителей в первой половине 50-х годов. Тогда было установлено, что плоские электрические и магнитные поля в состоянии фокусировать частицы в двух измерениях, действуя на их электрические заряды и магнитные моменты. Разработка электрических и магнитных линз позволила усовершенствовать приложения молекулярных пучков в спектропии и в сортировке их по состояниям. Линзы нашли также применение в аммиачном и водородном лазерах.

Следующим шагом на пути к ловушкам явилось создание квадрупольного масс-спектрометра, в котором действуют не только фокусирующие и дефокусирующие силы со стороны высокочастотных электромагнитных полей, но также и свойства устойчивости движения ионов, подобные методу жесткой фокусировки в ускорителях. Однако, если для ускорителей и накопительных колец требовалось удержание пучков высокой энергии и высокой плотности, то для ловушек более важным является удержание отдельных частиц сверхнизких энергий (несколько микро электрон-вольт).

В электрическом квадрупольном поле потенциал квадратично зависит от декартовых координат:

$$\Phi = \Phi_0 (\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2) / 2r_0^2$$

Из уравнения Лапласа $\Delta\Phi=0$ для данного вида потенциала вытекает условие: $\alpha+\beta+\gamma=0$.

Имеется два простых способа выполнить это условие:

а) $\alpha=1=-\gamma$, $\beta=0$. Это приводит к двумерному полю: $\Phi = \Phi_0 (x^2 - z^2) / 2r_0^2$
 Данная конфигурация порождается четырьмя электродами гиперболической формы, линейно протяженными вдоль оси y и реализуется в масс-спектрографах. Квадрупольные масс-спектрографы различных типов были исследованы в Боннском университете В.Паулем с сотрудниками. Для высокоточных измерений был сконструирован прибор длиной 6 м, точность которого в определении отношений масс составила $2 \cdot 10^{-7}$ при разрешающей способности $m/\Delta m=16\ 000$. Другой очень малый прибор был использован на ракетах для измерения распространенности атомов в высоких слоях атмосферы. Еще в одном эксперименте удалось провести разделение изотопов в миллиграммовых количествах, используя резонансный метод для «вытряхивания» ионов определенной массы из интенсивного пучка, направляемого квадруполем. Радиочастотный диполь, благодаря его универсальности и простоте, нашел широкое применение во многих областях науки и техники, как в качестве масс-спектрометра, так и виде

направляющей системы для пучков. Он стал разновидностью стандартного измерительного прибора; обсуждению его конструкции и свойств посвящена обширная литература.

б) $\alpha=\beta=1$, $\gamma=-2$. При этом возникает трехмерная конфигурация в цилиндрических координатах: $\Phi = \Phi_0 (r^2 - 2z^2) / (r_0^2 + 2z_0^2)$, причем $r_0^2 = 2z_0^2$. Такая конфигурация характерна для ионной ловушки и порождается кольцом в форме гиперboloида и двумя колпаками с гиперболической поверхностью, обладающие вращательной симметрией. Если в ловушку ввести ионы, а это делается ионизацией газа низкого давления электронным ударом, то они будут совершать вынужденные колебания в течение длительного времени. Для стабилизации орбит используется периодическое поле, а для охлаждения ионов применяется метод возбуждения флюоресценции с помощью лазерного излучения на боковой частоте, разработанный Вайлендом и Демельтом. После того, как движение ионов с помощью буферного газа будет погашено, случайно двигавшиеся частицы выстраиваются в регулярную структуру, образуя кристалл из нескольких ионов с расстояниями между ними порядка нескольких микрон. Данные эксперименты открыли новую область экспериментальной физики.

Если присоединить колпачковые электроды к активному радиочастотному контуру, то ионная ловушка будет работать как масс-спектрометр. Ионы, совершая резонансные колебания с возрастающей амплитудой, выходят через отверстие в колпачке и регистрируются с помощью фотоэлектронного умножителя. Таким образом можно детектировать весьма малое число ионов (вплоть до нескольких штук).

Если к квадрупольной ловушке приложить постоянное напряжение такой полярности, что ионы совершают устойчивые колебания в направлении z с частотой $\omega^2 = 2eU / mr_0^2$, то движение ионов в плоскости x, y будет неустойчивым, поскольку поле направлено наружу. При наложении магнитного поля в аксиальном направлении, движение вдоль оси z останется неизменным, а в плоскости x, y ионы будут совершать циклотронное движение с частотой ω , несколько меньше невозмущенной циклотронной частоты. Данное устройство носит название ловушка Пеннинга и является полезным для измерения магнитных свойств частиц, например, в экспериментах по спектроскопии зеэмановских переходов. Наиболее эффективное применение эта ловушка нашла в экспериментах Г.Грэффа, а также Х.Демельта, измеривших аномальный магнитный момент электрона с изумительной точностью за счет наблюдения одиночного электрона, хранимого в ловушке в течение многих месяцев.

Вольфгангу Паули на одном из экзаменов задали вопрос, можно ли удержать нейтроны в бутылке. Ответив тогда «нет», он впоследствии задумался и через тридцать лет придумал «магнитную бутылку». Подходящую конфигурацию поля такой бутылки имеет поле магнитного секступоля $B=B_0$, r^2 / r_0^2 возрастающее пропорционально r^2 , тогда как его градиент $\partial B / \partial r$ растет пропорционально r . Есть две возможности получить замкнутый

объем хранения: секступольная сфера и секступольный тор. При этом достаточные для эффективного удержания в течение нескольких секунд магнитные поля могут быть получены только с помощью сверхпроводящих магнитов. Для нейтральных атомов более эффективна сферическая ловушка в комбинации с техникой лазерного охлаждения, тогда как для удержания нейтронов – тороидальная ловушка. Такая конструкция является подходящей и для создания накопительного кольца для нейтронов. В 70-х годах было построено кольцо с диаметром орбиты 1 м с индукцией поля 3,5 Тл эффективно удерживающее нейтроны в интервале скоростей 5 – 20 м/с, т.е с максимальной кинетической энергией $2 \cdot 10^{-6}$ эВ, в течение 90 минут. В этих же экспериментах удалось измерить гравитационную массу нейтрона и ее совпадение с инертной массой. Таким образом, магнитное накопительное кольцо представляет собой весы с чувствительностью порядка 10^{-28} кг. Это достигается за счет того, что намного более значительные электрические силы здесь вообще не играют роли

Нобелевские лауреаты 2001 года добавили к четырем агрегатным состояниям вещества – плазме, газообразному, жидкому и твердому еще одно. **Конденсат Бозе — Эйнштейна** — агрегатное состояние материи, основу которой составляют охлаждённые до температур, близких к абсолютному нулю бозоны. В таком переохлаждённом состоянии большее число атомов оказывается в своих минимально возможных квантовых состояниях и квантовые эффекты начинают проявляться на макроскопическом уровне.

Теоретически предсказан как следствие из законов квантовой механики Альбертом Эйнштейном на основе работы Шатьендраната Бозе, где строилась статистическая механика для фотонов. Будучи не в состоянии самостоятельно опубликовать работу, Бозе отослал ее Эйнштейну, который организовал перевод статьи на немецкий язык и ее публикацию в 1925 году. Кроме того, в своей статье Эйнштейн развил и обобщил теорию Бозе на случай частиц имеющих массу. *(Примечательно, что рукопись этой работы Эйнштейна долгое время считалась утерянной и была обнаружена в библиотеке Лейденского университета в 2005 г.)* Результатом усилий Бозе и Эйнштейна стала концепция Бозе газа, подчиняющегося статистике Бозе — Эйнштейна, которая описывает статистическое распределение тождественных частиц с целым спином, называемых бозонами. Бозоны, которыми являются, например, как отдельные элементарные частицы — фотоны, пионы и другие мезоны, так целые атомы, могут находиться в одинаковых квантовых состояниях. Это кардинально отличает их от фермионов, для которых по принципу Паули подобное запрещено. Эйнштейн показал, что охлаждение атомов — бозонов до очень низких температур заставит их перейти или сконденсироваться в наинизшее возможное квантовое состояние. Результатом такой конденсации станет возникновение новой формы вещества. Для того чтобы произошла конденсация Бозе-Эйнштейна, плотность атомов в фазовом пространстве n

(выраженная в естественных единицах) должна быть больше некоторой величины порядка единицы. Данное условие может быть выражено также через длину волны де Бройля λ_D , которая должна быть достаточно большой, чтобы перекрываться с λ_D соседних атомов. Таким образом, необходимо чтобы

$$n \geq 2,61 \lambda_D^{-3} = 2,61 p^3 h^{-3}$$

Переход возникает ниже критической температуры, которая для однородного трёхмерного газа, состоящего из невзаимодействующих частиц спина s и массы m , определяется соотношением:

$$T_c = 3.31 n^{2/3} h^2 / m k_B (2s+1)^{2/3}$$

где: T_c - критическая температура, n - концентрация частиц, h - постоянная Планка, k_B - постоянная Больцмана.

Предсказание Бозе-Эйнштейна конденсации не воспринималось слишком серьезно даже самим Эйнштейном, пока Фриц Лондон и Ласло Тиса не воскресили эту идею в середине 30-х годов как возможный механизм, объясняющий сверхтекучесть в жидком гелии-4. В их работе конденсация Бозе-Эйнштейна была использована для демонстрации квантовых свойств в макроскопических масштабах. Впоследствии подобные свойства были обнаружены в сверхпроводниках, сверхтекучем гелии-3 и в оптических квантовых генераторах – лазерах. Тем самым были реализованы макроскопические квантовые состояния трех типов.

Однако, первый «истинный» конденсат Бозе-Эйнштейна был получен семьдесят лет спустя после предсказания Эйнштейна в 1995 году. Это было сделано Эриком Корнеллом и Карлом Виманом в Университете штата Колорадо в лаборатории Boulder NIST-JILA. Учёные использовали газ из атомов рубидия, охлаждённый до 170 нанокельвин или -273.14999983°C. За эту работу им, совместно с Вольфгангом Кеттерле из Массачусетского технологического института, была присуждена Нобелевская премия по физике 2001 года.

Конденсаты — это чрезвычайно низкотемпературные жидкости со свойствами, которые в настоящий момент не до конца понятны. Данное явление является непосредственным проявлением законов квантовой механики, согласно которым система может получать энергию только дискретно. Если система находится при настолько низких температурах, что пребывает в наинизшем энергетическом состоянии, то она уже не в состоянии уменьшить свою энергию даже за счёт трения. В частности, жидкость без трения легко преодолевает гравитационное притяжение благодаря молекулярному сцеплению жидкости со стенками сосуда, и занимает наиболее выгодное положение — вне сосуда.

Эрик Аллин Корнелл (Eric Allin Cornell) — американский физик, родился 19

декабря 1961 года в Пало-Альто, (США) в семье профессора строительных наук в МТИ и учительницы английского языка. Изучал физику в Стэнфордском университете и после получения в МТИ в 1985 году диплома, работал в Кембридже — городе, в котором он жил с двух лет. Работал в группе Дэйва Притчарда над определением массы ^3He и ^3H . В 1990 году защитил докторскую диссертацию. Интересно отметить, что после ухода Корнелла из МТИ в группу Притчарда пришёл Вольфганг Кеттерле, вместе с которым Корнелл разделил позднее Нобелевскую премию. Корнелл подал заявку на место постдока в группу Дэйва Винеланда в NIST, однако не получил одобрения. Вместо этого его порекомендовали в группу Карла Вимана, который работал в NIST в городе Болдер в штате Колорадо. После окончания двухлетней постдоковской стипендии он остался там работать ассистентом профессора. В 1995 году становится профессором, с 1994 года является членом NIST.

В 2001 году Корнелл получил Нобелевскую премию по физике, совместно с Вольфгангом Кеттерле и Карл Виманом «за достижения в изучении процессов конденсации Бозе — Эйнштейна в среде разряженных газов и за начальные фундаментальные исследования характеристик конденсатов». После успешного получения конденсата Бозе-Эйнштейна занимается исследованием его свойств.

Член американского физического общества (1997), американского оптического общества (2000), национальной академии наук США (2000).

Награда имени Самюэля Уэсли Страттона, NIST, 1995. Премия имени Ньюкомба Кливленда, американская ассоциация содействия науке, 1995-96. Золотая медаль министерства коммерции, 1996. Премия имени Фритца Лондона в области физики низких температур, 1996. Премия Карла Цейса, Фонд Эрнста Аббе, 1996. Премия имени Алана Т. Ватермана от национального научного фонда, США, 1997. Премия Раби по атомной физике, молекулярной физике и оптике, американское физическое общество 1997. Медаль Лоренца, Нидерландская королевская академия наук, 1998. Медаль Бенджамина Франклина по физике, 1999. Премия Р. В. Вуда, оптическое общество США, 1999.

В 1995 году Корнелл женился на Целесте Ландри, с которой был знаком более 10 лет, ещё в Стэнфорде. У них две дочери — Элиза и София.

В 2004 году ему ампутировали левую руку по причине заражения некротирующим фасциитом. В 2006 году он снова приступил к работе.

Вольфганг Кеттерле (Wolfgang Ketterle) немецкий физик, родился 21 октября 1957 года в Гейдельберге. Вольфганг Кеттерле был вторым ребёнком в семье из трёх детей. Закончил курсы подготовки к университету в гимназии имени Бунзена в Гейдельберге. В 1976 году приступает к изучению

физики в Гейдельбергском университете. После преддиплома переходит в Мюнхенский технический университет, где начинает заниматься теоретической физикой. В 1982 году защищает диплом по теме «Релаксации спина в неупорядоченных материалах» и переходит в институт квантовой оптики общества Макса Планка в Гархинге. Впоследствии переходит в Мюнхенский университет имени Людвига Максимилиана в группу Герберта Вальтера, где в 1986 году защищает диссертацию по теме «Спектроскопия гидридов гелия и трёхатомных молекул водорода». После пребывания в Гархинге Кеттерле возвращается в Гейдельберг, где на кафедре Юргена Вольфрума проводит исследования по моторам внутреннего сгорания. В 1990 году он снова меняет область деятельности и переселяется в США, чтобы в группе Дэйва Притчарда работать над задачей лазерного охлаждения. В 1993 году он присоединился к физическому факультету МТИ, где до сих пор занимает кафедру физики, спонсируемую фондом имени Джона Мак-Артура.

Во время аспирантуры Кеттерле удалось доказать существование гидрида гелия (HeH) и впервые получить спектры этой молекулы. Во время постдокской работы в Гархинге ему удалось, кроме того, полностью объяснить эти спектры. Позднее Герберт Вальтер описал его работу одним предложением: «Он создал новую область физики и сам же её убил».

В 1995 году Кеттерле был одним из первых, кому удалось создать конденсат Бозе — Эйнштейна. В 1997 году он продемонстрировал атомный лазер. В 2001 году, совместно с Эриком Корнеллом и Карлом Виманом был удостоен Нобелевской премии по физике «за достижения в изучении процессов конденсации Бозе — Эйнштейна в среде разряженных газов щелочных металлов и за начальные фундаментальные исследования характеристик конденсатов».

Другие награды: 1996 год- Стипендия Давила и Люси Паккард. 1997год- Премия имени Раби, Американское физическое общество. 1997год- Премия имени Густава Герца, Немецкое физическое общество. 1998 год- Награда журнала Дискавер за технические инновации. 1999 год- Премия имени Фритца Лондона по физике низких температур. 1999год- Премия имени Данни Хайнемана, Гёттингенская академия наук. 2000 год- Медаль имени Бенджамина Франклина по физике. 2002год- Федеральный крест заслуг (Лента и Звезда) ФРГ. 2004 год-Награда имени Киллиана МТИ.

В 1986 году Кеттерле женился на Габриелле Зауэр, с которой он был знаком ещё со школьной скамьи. У него три ребёнка — Йонас (1986), Йоганна (1988) и Хольгер (1992)

Карл Виман (Carl Wieman) американский физик, родился 26 марта 1951 года в Корвалисе США. Карл Виман был четвёртым из пяти детей в семье Н. Орра Вимана и Элисон Виман. Детство провёл в Орегоне, США. Незадолго до того, как Виман перешёл в седьмой класс школы, семья переехала в

Корвалис, с тем, чтобы позволить детям посещать более хорошие школы. Несмотря на то, что Корвалис насчитывает всего 25 тысяч жителей, в нём находится университет штата Орегон.

После окончания средней школы он становится студентом Массачусетского технологического института. После прохождения общего курса лекций он переходит в Стэнфордский университет на кафедру Теодора Хенша, у которого в 1977 году защищает диссертацию. После этого он работает в университете Мичигана в городе Энн Арбор и становится там в 1979 году ассистентом профессора. Здесь он знакомится с Сарой Гильберт, которая студенткой работала вместе с ним. В 1984 году он переходит в университет Колорадо и женится на Саре Гильберт, которая к тому времени уже тоже защитила диссертацию. В 1987 году он становится профессором физики в университете Колорадо.

В группе Хенша Виман занимался прецизионными измерениями длин волн спектральных линий водорода. Темой его диссертации было измерения лэмбовского сдвига уровня $1s$, и изотопного сдвига перехода $1s-2s$ при помощи поляризационной спектроскопии. На основе своего опыта в области прецизионной спектроскопии он хотел заняться в Мичиганском университете измерениями нарушения чётности в атомах, предсказанного теорией электрослабого взаимодействия. Очень быстро он осознал, что для этих целей более подходит цезий, а не водород. Успешные измерения в 1985 года принесли ему признание научного сообщества. С 1984 года Виман занимался также лазерным охлаждением и лазерными ловушками. Сначала он интересовался этим только в связи с улучшением своего метода измерения. Однако вскоре он осознал, что таким образом можно исследовать поведение атомов при очень низких температурах и произвести конденсацию Бозе — Эйнштейна. В 1995 году, совместно с Эриком Корнеллом, это ему удалось. За данный результат он был удостоен в 2001 году Нобелевской премии по физике (совместно с Эриком Корнеллом и Вольфгангом Кеттерле). Член национальной академии наук США (1995), американской академии искусств и наук (1998). Стипендия Гугенхейма, 1990—1991. Премия имени Е. О. Лоуренса по физике, 1993. Медаль Эйнштейна за лазерные науки от общества оптической и квантовой электроники, 1995 Премия Фрица Лондона по физике низких температур от международного союза теоретической и прикладной физики, 1996. Премия Ньюкомба-Кливленда от американской ассоциации по развитию науки, 1996. Научный приз фонда Бонфилс-Стаантона, 1997. Медаль Лоренца от королевской Голландской академии Искусств и Наук, 1998. Приз Шавлова за лазерные науки от американского физического общества, 1999. Медаль Бенджамина Франклина по физике от института Франклина, 2000.

Первые год-два эти эксперименты являлись шедеврами экспериментального искусства, и только в последнее время конденсат Бозе-Эйнштейна начал

получаться в различных лабораториях мира - тогда-то и посыпался шквал экспериментальных и теоретических работ о всевозможных явлениях, связанным с ним. Эта лавина работ (и новых открытий!) продолжается и сейчас. Можно сказать, ученые наконец-то нашли долгожданную золотую квантовую жилу.

Вот некоторые из **последних достижений в этой области:**

Очень интересными оказались недавние эксперименты, проведенные в Университете Колорадо по завихрению конденсата Бозе-Эйнштейна. В силу своих квантовых свойств, вихри в конденсате могут, грубо говоря, вращаться только с определенной угловой скоростью, т.е. угловой момент такого вихря квантуется. Такие квантованные вихри, конечно, предсказывались теорией, однако создание подобных микроскопических квантовых объектов вручную оказалось делом очень трудным. Дело в том, что здесь необходимо хирургически точное, выверенное воздействие на конденсат, не разрушающее его, и не привносящее лишнюю энергию (все-таки температура атомного сгустка составляет доли микрокельвина!).

В данных экспериментах таким микроскопическим скальпелем служил сфокусированный лазерный луч. Экспериментаторы сначала получали конденсат Бозе-Эйнштейна атомов двух сортов, отличавшихся внутренним состоянием. Воздействуя на атомы одного сорта лазером поочередно в разных секторах атомного сгустка, ученые заставляли атомы второго сорта двигаться самостоятельно - возникал вихрь. После того, как внешнее воздействие прекращалось, вихрь продолжал вращаться со скоростью один оборот за 3 секунды. Это отвечало ровно тому минимальному значению углового момента, которое еще разрешается квантовой механикой.

Другая группа, на этот раз из MIT, проделала еще более простой (на первый взгляд) эксперимент - просто двигала сфокусированный лазерный луч сквозь сгусток атомов. Имея очень небольшую мощность, лазер просто вытеснял атомы из фокуса, делая «дырку» размером 13 мкм в БК шириной 45 мкм, и больше сам по себе никак на конденсат не воздействовал. Однако, когда эта дырка начинала двигаться через атомный сгусток, конденсат должен был ее обтекать - и тут-то и начинались интересные эффекты. При достаточно больших скоростях движения ($v > 2$ мм/сек), такое вынужденное движение атомов заставляло сгусток нагреваться. Явление вполне понятное - если вы погрузите какой-нибудь предмет в воду и начнете его там двигать, он будет заставлять воду двигаться, будет передавать ей часть своей энергии, и тем самым ее нагревать. Для атомного сгустка это должно приводить к частичному или полному разрушению бозе конденсата, т.е. переходу его в обычное несконденсированное состояние, что и наблюдалось в эксперименте. Однако, когда скорость движения дырки была меньше 2 мм/сек, никакого нагревания не происходило вообще. Это означало, что конденсат обтекал дырку когерентно, как единый квантовый объект, и

никакой энергии ему не передавалось. Можно говорить, что при таких скоростях дырка не испытывает никаких сил вязкого трения со стороны конденсата (и конденсат со стороны дырки - тоже), явление знакомое ученым по поведению гелия-4 при очень низких температурах. По сути, это есть первое прямое наблюдение явления сверхтекучести в разреженном атомном конденсате Бозе-Эйнштейна.

Еще одним интересным классом экспериментов является наблюдение так называемого резонанса Фешбаха, также впервые произведенное в MIT. Оказывается, что в присутствии внешнего магнитного поля, меняется взаимодействие между атомами в конденсате Бозе-Эйнштейна, причем можно менять не только силу взаимодействия, но даже и то, будут частицы отталкиваться или притягиваться. Но в конденсате Бозе-Эйнштейна изменение микроскопических свойств приводит к качественным изменениям всего сгустка в целом. Оказывается, при определенном внешнем магнитном поле атомы начинают образовывать связанные состояния - своего рода молекулы. Они существуют в течение некоторого времени, затем распадаются опять - но в рамках всего атомного сгустка происходит качественное изменение: в каждый момент времени значительная часть атомов находится в состоянии молекул.

В результате вместо одного конденсата Бозе-Эйнштейна - стало два, конденсат атомов и конденсат молекул, две одновременно сосуществующие фазы газа атомов при сверхнизких температурах.

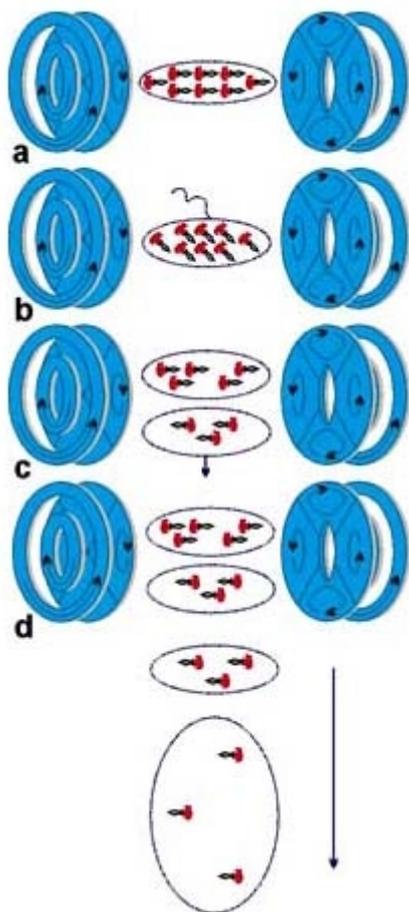
Важно отметить, что для проведения этих наблюдений было крайне важным использование чисто оптической ловушки. Использование магнитной ловушки для удержания атомов моментально связало бы экспериментаторам руки, поскольку именно подстройкой внешнего магнитного поля и удавалось модифицировать межатомное взаимодействие.

Мораль всех этих экспериментов проста, но крайне важна: экспериментаторы научились контролировать и изменять в лабораторных условиях свойства и структуру квантовых газов в микроскопических и макроскопических масштабах. Перспективы такого «тотального контроля» крайне интригующи: уже сейчас подобное воздействие применяется в первых опытных образцах квантовых компьютеров и атомных лазеров.

Первыми получили конденсат Бозе-Эйнштейна американцы. Немец Кеттерле был разочарован, узнав, что Корнелл и Вейман его опередили. Однако решил продолжать собственные эксперименты. На то были, впрочем, особые причины. Во-первых, он шел своим путем. Во-вторых, в своих опытах он использовал атомы натрия, а не рубидия. И спустя три месяца он тоже добился желаемого результата. Причем ему удалось получить в 100 раз больше конденсата, чем конкурентам. Кроме того, на основе конденсата Бозе - Эйнштейна он решил построить **атомный лазер**.

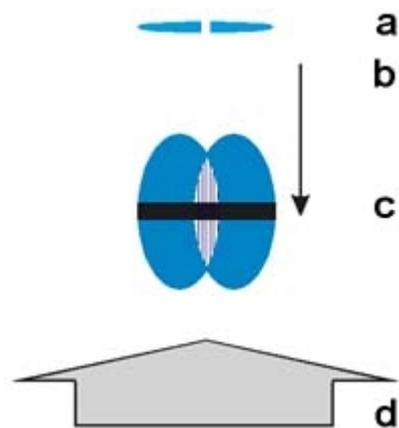
И создал его в 1996 году.

В отличие от света, испускаемого обычной лампочкой, лазер, как известно, испускает когерентное излучение. То есть все испускаемые им фотоны имеют одну и ту же энергию, длину и фазу волны. Если вместо света использовать синхронизированные атомы - как раз такие, что составляют конденсат Бозе - Эйнштейна, - можно говорить об атомном лазере, обладающем большей эффективностью, нежели обычный.



Принципиальная схема атомного лазера. Сначала бозе-конденсат удерживается магнитной ловушкой (а). У всех атомов при этом электронные спины направлены параллельно магнитному полю (условное направление "вверх"). Затем короткий импульс высокочастотного излучения "наклоняет" спины атомов (b). Согласно принципам квантовой механики, "наклоненный" спин является суперпозицией (смесью) состояний "спин-вверх" и "спин-вниз". Атомы со спином "вниз" тут же выталкиваются магнитным полем. Атомная "капля" "жидкого света" выводится из магнитной ловушки (с) и затем расширяется, устремляясь к цели (d).

Наблюдение когерентности бозе-конденсата. В магнитной ловушке создается "атомный снежок" сигароподобной формы (а). С помощью лазерного луча конденсат разрезается на две части (b). Затем магнитное силовое поле отключается, и обе половинки падают вниз, постепенно "наезжая" друг на друга. В области перекрытия возникает четкая интерференционная картина (с), которая наблюдается на экране с помощью оптического лазера (d).



Между оптическим и атомным лазерами есть как аналогии, так и различия. Аналогом активной среды оптического лазера в атомном выступает бозе-конденсат из ультрахолодных атомов. В обоих случаях

внешняя энергия приводит к тому, что из активной среды вырывается когерентное излучение. Но происходит это не в результате спонтанного излучения атомов активной среды, как в оптическом лазере, а вследствие более сложного взаимодействия атомов, которое приводит к образованию своеобразных капель «жидкого света». Они обладают чуть меньшей скоростью, нежели фотоны, зато намного большей энергией.

Использовать вместо луча света пучок атомов предлагалось еще четверть века тому назад, когда в Америке началась разработка программы «Звездные войны». Такая замена резко бы увеличила мощность луча, что было необходимо для оружия, подготавливаемого для войн в космосе. Но интересен такой лазер не только мощностью.

Как предполагают ученые, с помощью атомного лазера можно будет вести изготовление микросхем с такими возможностями, о которых мы сегодня и мечтать не смеем. Ведь новый инструмент позволяет распорядиться атомами поштучно, выстраивая из них, словно из кирпичей, какие угодно ансамбли. А совсем недавно в Институте квантовой оптики имени М. Планка был создан микрочип величиной в почтовую марку. Он заключен в резервуар и содержит миниатюрную оптическую ловушку, которая позволяет получать конденсат Бозе - Эйнштейна. Вероятно, такой микрочип может стать основой компьютеров шестого поколения с невиданными ранее возможностями по быстрдействию.

Физикам из США впервые удалось также создать новое состояние вещества - **фермионный конденсат**. Конденсат состоит из пар фермионных атомов при сверхнизкой температуры. По мнению одного из участников разработки Деборы Джин, это поможет понять природу сверхпроводимости и сверхтекучести, а также создать сверхпроводники, работающие при комнатных температурах.

Американские ученые предприняли попытку получить своего рода молекулы из атомов-фермионов при глубоком охлаждении. Отличие от настоящих молекул заключалось в том, что между атомами не было химической связи - просто они двигались вместе, коррелированным образом. Связь между атомами оказалась даже прочнее, чем между электронами в куперовских парах. У образованных пар фермионов суммарный спин уже не кратен $1/2$, следовательно, они уже ведут себя как бозоны и могут образовывать бозе-конденсат с единым квантовым состоянием. В ходе эксперимента охлаждали газ из атомов калия-40 до 300 нанокельвинов, при этом газ заключался в так называемую оптическую ловушку. Затем наложили

внешнее магнитное поле, с помощью которого удалось изменить природу взаимодействий между атомами - вместо сильного отталкивания стало наблюдаться сильное притяжение. При анализе влияния магнитного поля удалось найти такое его значение, при котором атомы стали вести себя, как куперовские пары электронов. На следующем этапе эксперимента ученые предполагают получить эффекты сверхпроводимости для фермионного конденсата.

Глава 6. Сверхтекучесть и сверхпроводимость.

Бозе – Эйнштейна конденсация. Квантовые жидкости. Сверхтекучесть и сверхпроводимость были открыты в лаборатории и до сих пор не наблюдались на Земле в природных условиях, равно как и вне Земли. Первое вполне понятно, поскольку сверхтекучесть и сверхпроводимость имеют место при весьма низких температурах. Что касается Космоса, то не исключена сверхпроводимость сильно сжатого вещества $\rho \approx 1-100 \text{ г/см}^3$, в частности, металлического водорода. Такое вещество существует в недрах массивных планет (типа Юпитера) и в некоторых периферических слоях звезд - белых карликов и не очень горячих нейтронных звезд.

В основе явления сверхтекучести и сверхпроводимости лежит Бозе – Эйнштейновская конденсация, которая представляет собой квантовое явление в системе частиц с целым спином (бозонов), состоящее в том, что при температуре ниже некоторой температуры вырождения значительная часть частиц скапливается в состоянии с нулевым импульсом (если система как целое покоится). Название было дано по аналогии с процессом конденсации молекул пара в жидкость при его охлаждении. Однако никакой конденсации в обычном смысле слова не происходит, распределение частиц в пространстве остается прежним, и речь идет лишь о конденсации в пространстве импульсов. Для подавляющего большинства газов температура вырождения очень мала и вещество переходит в твердое состояние гораздо раньше чем может наступить Бозе – Эйнштейна конденсация. Поэтому на протяжении долгого времени проявление Бозе – Эйнштейна конденсации наблюдалось только в квантовых жидкостях. Только во второй половине 90-х годов XX века после отработки методики манипулирования с отдельными атомами и лазерного охлаждения вещества до предельно близких к абсолютному нулю температур удалось непосредственно наблюдать образование связанных пар отдельных атомов цезия с противоположными направлениями импульсов и спинов с последующим их накоплением в основном состоянии, что отвечает непосредственно Бозе – Эйнштейна конденсации. Таким образом, с момента первых теоретических работ в 1924-1925 годах до присуждения Нобелевской премии 2001 года за непосредственное исследование Бозе – Эйнштейна конденсации прошло более 75 лет. (Один из самых долгих периодов времени от теоретического предсказания до непосредственного экспериментального исследования феномена). Однако, при этом необходимо учитывать, что еще в 1938 году П.Л Капицей были открыты квантовые жидкости и развернулись исследования происходящих в них эффектов.

Квантовые эффекты начинают проявляться в жидкостях при достаточно низких температурах, когда длина волны де Бройля, вычисленная по энергии теплового движения частиц жидкости становится сравнимой с расстоянием между ними. Сохранение жидкого состояния вплоть до абсолютного нуля температуры также является квантовым эффектом, связанным с нулевыми колебаниями. Амплитуда нулевых колебаний тем больше, чем слабее силы взаимодействия между частицами и меньше их масса. Если амплитуда нулевых колебаний сравнима со средним расстоянием между частицами тела, то оно остается жидким вплоть до абсолютного нуля температуры.

Из всех веществ только два изотопа гелия (He^4 и He^3) имеют достаточно малую массу и настолько слабое взаимодействие между атомами, что остаются жидкими при атмосферном давлении в непосредственной близости от абсолютного нуля, представляя собой квантовые жидкости.

Квантовые жидкости делятся на бозе - жидкости и ферми - жидкости, в зависимости от того каков спин образующих их частиц – целый или полуцелый. (Например, бозе – жидкостью является жидкий He^4 , атомы которого имеют спин равный нулю, ферми – жидкостью, жидкий He^3 , атомы которого имеют спин $1/2$). Своеобразной ферми – жидкостью являются электроны проводимости в металле (и еще более своеобразной – в полупроводниках).

Изменение энергии в квантовой жидкости сопровождается рождением квазичастиц, обладающих квазиимпульсом $\vec{P} = \hbar \vec{k}$ и энергией $E = \hbar \omega(\vec{k})$, где $\omega(\vec{k})$ - частота, \vec{k} - волновой вектор. В зависимости от характера взаимодействия в система, закон дисперсии $E = f(\vec{p})$ может быть различным, что соответствует различным типам квазичастиц. В квантовых жидкостях при малых температурах наибольшее значение имеют фотоны, связанные с тепловыми колебаниями частиц, энергия возбуждения списывается соотношением

$$E(p) = Pc_3 \tag{1}$$

где c_3 - скорость звука.

В области температур $T \geq 0,6K$ и импульсов P_0 спектр возбуждения удовлетворяет формуле

$$E(p) = \Delta + \frac{(P - P_0)^2}{2\mu} \quad \text{где } \mu \text{ - эффективная масса} \tag{2}$$

Соответствующие квазичастицы носят название ротонов. Таким образом, полный спектр возбуждений имеет вид, приведенный на Рис. 1. Эмпирически данный спектр был построен Л.Д. Ландау, для модели слабо неидеального бозе – газа был получен теоретически Н.Н. Боголюбовым, а для достаточно общего взаимодействия в бозе – газе - Р. Фейнманом.

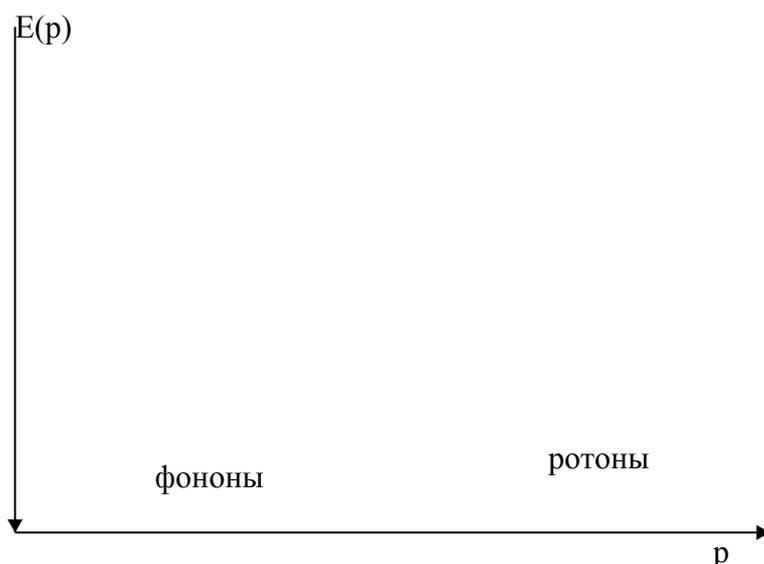


Рис.1.Спектр возбуждений в квантовой жидкости.

Статистическая механика фонон-ротонного газа объясняет большую часть сверхтекучих свойств жидкого гелия, а также целый ряд других эффектов, в частности, второй звук. (Помимо обычных колебаний давления и плотности квантовой жидкости, соответствующих обычному звуку, в ней распространяются также и слабозатухающие температурные волны – второй звук или звуковые колебания в газе фононов- ротонов.)

Если в бозе – жидкостях квазичастицы образуются поодиночке, то в ферми – жидкости допустимо их образование только парами, причем, в соответствии с принципом Паули, они находятся не в одном состоянии, а заполняют в импульсном пространстве сферу Ферми. При $T=0$ вне сферы Ферми квазичастиц нет. При отличных от нуля температурах появляются квазичастицы с импульсами за пределами сферы Ферми, а внутри ее – дырки. Изменения, происходящие вблизи поверхности ферми-сферы с квазичастицами, определяют все явления, которые наблюдаются вблизи абсолютного нуля температуры.

Взаимодействие квазичастиц в ферми – жидкости проявляется в частности, в том, что в жидкости при $T=0$ могут распространяться незатухающие колебания – нулевой звук.

Если между частицами ферми – жидкости имеется притяжение, то при температуре ниже некоторой критической T_c (связанной с величиной притяжения) квазичастицы объединяются в пары Купера. Эти пары подчиняются статистике Бозе – Эйнштейна и образуют при конденсации сверхтекучую компоненту, т.к. для разрыва пары и создания возбуждения необходимо затратить конечную энергию. Сверхтекучесть электронной ферми – жидкости проявляется как сверхпроводимость (Н.Н. Боголюбов, 1958 год).

В жидком He^3 притяжение между квазичастицами очень мало и характерно только для больших расстояний, т.е. оно обусловлено

молекулярными взаимодействиями, а на близких расстояниях имеет место отталкивание. Поэтому частицы, образующие куперовскую пару в жидком He^3 , должны находиться далеко друг от друга и обладать нулевым орбитальным моментом, тем самым, пары вращаются. Переход He^3 в сверхтекучее состояние был открыт в 1972 году американскими физиками Д. Ли, Д. Ошеровым, Т. Ричардсоном. Температура фазового перехода T_k равна $2,6 \cdot 10^{-3} K$ при давлении 34 атм. и плавно уменьшается при падении давления вплоть до $T_k = 9 \cdot 10^{-4} K$ при $p = 0$.

Ошерофф Дуглас Дин (*Osheroff Douglas Dean*), американский физик, член Национальной АН. Родился 1 августа 1945 года в Абердине (штат Вашингтон). Окончил Калифорнийский технологический институт (1967), докторскую степень получил в Корнельском ун-те (1973). В 1972 – 87 годах – в «Белл» лаборатории (с 1981 года – глава отдела исследования твердого тела и низких температур). Профессор Станфордского университета с 1987 года (в 1991 – 96 годах – руководитель физического департамента). В 1972 – 74 годах совместно с Д. Ли и Р. Ричардсоном открыл и исследовал явление сверхтекучести изотопа гелия — 3He . Работы по магнитным переходам в твердом гелии. Работы по низкотемпературным свойствам аморфных тел. Принимал участие в работах по программе «Шаттл – Колумбия». Нобелевская премия (1996, совместно с Д. Ли и Р. Ричардсоном). Премия Саймона (1976), Оливера Э. Бакли (1981), Мак-Артура (1981).

Ли Дэвид Моррис (*Lee David Morris*) - американский физик, родился 20 января 1931 года в Тяньцзине. Член Национальной АН США. Окончил Гарвардский университет (1952). Докторскую степень получил в Йельском ун-те (1959). Профессор Корнеллского университета (1959). В 1972 – 74 годах совместно с Д. Ошероффом и Р. Ричардсоном открыл и исследовал явление сверхтекучести изотопа гелия 3He . Эти работы удостоены Нобелевской премии 1996 года (совместно с Д. Ошероффом и Р. Ричардсоном). Иностраный член РАН с 2003.

Ричардсон Роберт Колман (*Richardson Robert Coleman*) — американский физик, член Национальной АН (1986). Родился 26 июня 1937 года в Вашингтоне. Учился в Виргинском Политехническом институте (бакалавр- 1958; магистр-1960). Докторскую степень получил в 1965 году в Университете Дюка. В 1959 – 60 годах и с 1966 года - в Корнельском ун-те (с 1968 года – профессор). В 1990 – 97 годах – директор Лаборатории физики атома и твердого тела. С 1998 года – проректор по исследовательской работе.

Работы связаны с физикой низких температур и сверхтекучестью, свойствам квантовых жидкостей, ЯМР при сверхнизких температурах. В 1972 - 74 совместно с Д. Ли и Д. Ошероффом открыл и исследовал явление сверхтекучести изотопа гелия 3He . Нобелевская премия 1996 года

(совместно с Д. Ошеровым и Д. Ли) «за открытие сверхтекучести гелия-3».

Теория явлений в сверхтекучем He^3 разработана Э. Легеттом (Нобелевская премия 2003 г.).

Легетт Энтони Джеймс (Leggett Anthony James) – английский и американский физик. Родился 26 марта 1938 года в Кэмбервилле, южный Лондон. Докторская степень по физике получил в 1964 году в Оксфордском университете. Профессор в Иллинойском университете (Урбана-Шампейн, штат Иллинойс, США).

Работы в области сверхпроводников и сверхтекучести. В 1970-х годах создал теорию, объясняющую поведение и распределение атомов вещества в сверхтекучем состоянии. (Нобелевская премия 2003 года). Проводит исследования, цель которых - попытаться объяснить, как подобное упорядочение переходит в хаос или в турбулентность. Иностраннный член РАН. Премия Вольфа (2002).

Еще одной интересной идеей, высказанной в теории квантовых жидкостей, в последние годы является концепция фликкер - шума. В какой-то степени эта концепция дает ответ на старый вопрос: почему в сверхпроводнике, который как всякая сплошная среда является диссипативной системой, возможен незатухающий электрический ток? Одно из объяснений существования незатухающего электрического тока сводится к появлению на низких частотах фликкер – шума и соответствующих остаточных временных корреляций. При этом нижняя граница спектра фликкер – шума определяется временем жизни самой физической установки.

Ситуация, когда шум определяет возможность когерентного состояния, каковым является сверхпроводящий ток, не является парадоксальной, поскольку естественный фликкер – шум сам по себе есть когерентное состояние системы. С точки зрения ретроспективы, данные концепции представляют новый виток обобщения и развития взглядов В. Гейзенберга на взаимодействие установки и объекта в процессе измерения, а также на теорию когерентности.

Сверхтекучесть. Сверхтекучесть представляет собой свойство квантовой жидкости, при котором она протекает через узкие щели и капилляры без трения.

Сверхтекучим становится жидкий гелий He^4 при температуре ниже, так называемой, лямбда – точки $T_\lambda = 2,17K$ и давлении насыщенных паров $P=38,8$ мм рт.ст. Сверхтекучий гелий He^4 носит название $He II$, не сверхтекучий гелий - $He I$. Сверхтекучесть гелия II была открыта П.Л. Капицей в 1938 году.

Один из крупнейших физиков современности **Петр Леонидович Капица** (09.07.1894 – 08.04.1984) родился в Кронштадте, военно-морской крепости, расположенной на острове в Финском заливе неподалеку от Санкт-Петербурга, где служил его отец Леонид Петрович Капица, генерал-лейтенант инженерного корпуса. Мать Капицы Ольга Иеронимовна Капица (Стебницкая) была известным педагогом и собирательницей фольклора. По окончании гимназии в Кронштадте Капица поступил на факультет инженеров-электриков Петербургского политехнического института, который окончил в 1918 году. Следующие три года он преподавал в том же институте. Под руководством А.Ф. Иоффе, первым в России приступившего к исследованиям в области атомной физики, Капица вместе со своим однокурсником Николаем Семеновым разработал метод измерения магнитного момента атома в неоднородном магнитном поле, который в 1921 году был усовершенствован и реализован экспериментально Отто Штерном.

Студенческие годы и начало преподавательской работы Капицы пришлось на Октябрьскую революцию и гражданскую войну. Это было время бедствий, голода и эпидемий. Во время одной из таких эпидемий погибла молодая жена Капицы – Надежда Черносвитова, с которой они поженились в 1916 году, погибли и двое их маленьких детей. Иоффе настаивал на том, что Капице необходимо отправиться за границу, но революционное правительство не давало на это разрешения, пока в дело не вмешался Максим Горький, самый влиятельный в ту пору русский писатель. В 1921 году Капице позволили выехать в Англию, где он стал сотрудником Эрнеста Резерфорда, руководителя Кавендишской лаборатории Кембриджского университета. Первоначально встреченный прохладно и настороженно, Капица быстро завоевал уважение Резерфорда и стал его другом.

Первые исследования, проведенные Капицей в Кембридже, были посвящены отклонению испускаемых радиоактивными ядрами альфа- и бета-частиц в магнитном поле. Эксперименты подтолкнули его к созданию мощных электромагнитов. Разряжая электрическую батарею через небольшую катушку из медной проволоки (при этом происходило короткое замыкание), Капице удалось получить магнитные поля, в 6-7 раз превосходившие все прежние. Разряд не приводил к перегреву или механическому разрушению прибора, т.к. продолжительность его составляла всего лишь около 0,01 секунды.

Создание уникального оборудования для измерения температурных эффектов, связанных с влиянием сильных магнитных полей на свойства вещества, например на магнитное сопротивление, привело Капицу к изучению проблем физики низких температур. Чтобы достичь таких температур, необходимо было располагать большим количеством

сжиженных газов. Разрабатывая принципиально новые холодильные машины и установки, Капица использовал весь свой недюжинный талант физика и инженера. Вершиной его творчества в этой области явилось создание в 1934 году необычайно производительной установки для сжижения гелия, который кипит или сжижается при температуре около 4,2К. Сжижение этого газа считалось наиболее трудным. Впервые жидкий гелий был получен в 1908 году голландским физиком Хейке Каммерлинг-Оннесом, удостоенным за это Нобелевской премии 1913 года. Но установка Капицы была способна производить 2 л жидкого гелия в час, тогда как по методу Каммерлинг-Оннеса на получение небольшого его количества с примесями требовалось несколько дней. В установке Капицы гелий подвергается быстрому расширению и охлаждается прежде, чем тепло окружающей среды успеет согреть его; затем расширенный гелий поступает в машину для дальнейшей обработки. Капице удалось преодолеть и проблему замерзания смазки движущихся частей при низких температурах, использовав для этих целей сам жидкий гелий.

В Кембридже научный авторитет Капицы быстро рос. Он успешно продвигался по ступеням академической иерархии. В 1923 году Капица стал доктором наук и получил престижную стипендию Джеймса Клерка Максвелла. В 1924 году он был назначен заместителем директора Кавендишской лаборатории по магнитным исследованиям, а в 1925 году стал членом Тринити-колледж. В 1928 году Академия наук СССР присвоила Капица ученую степень доктора физико-математических наук и в 1929 году избрала его членом-корреспондентом. В следующем году Капица становится профессором-исследователем Лондонского королевского общества. По настоянию Резерфорда Королевское общество строит специально для Капицы новую лабораторию. Она была названа лабораторией Монда в честь химика и промышленника германского происхождения Людвиг Монда, на средства которого, оставленные по завещанию Лондонскому королевскому обществу, была построена. Открытие лаборатории состоялось в 1934 году. Ее первым директором стал Капица. Но ему было суждено там проработать всего лишь один год.

Отношения между Капицей и советским правительством всегда были довольно загадочными и непонятными. За время своего тринадцатилетнего пребывания в Англии Капица несколько раз возвращался в Советский Союз вместе со своей второй женой, урожденной Анной Алексеевной Крыловой, чтобы прочитать лекции, навестить мать и провести каникулы на каком-нибудь русском курорте. Советские официальные лица неоднократно обращались к нему с просьбой остаться на постоянное жительство в СССР. Капица относился с интересом к таким предложениям, но выставлял определенные условия, в частности свободу поездок на Запад, из-за чего решение вопроса откладывалось. В конце лета 1934 года Капица вместе с женой в

очередной раз приехали в Советский Союз, но, когда супруги приготовились вернуться в Англию, оказалось, что их выездные визы аннулированы. После яростной, но бесполезной стычки с официальными лицами в Москве Капица был вынужден остаться на родине, а его жене было разрешено вернуться в Англию к детям. Несколько позднее Анна Алексеевна присоединилась к мужу в Москве, а вслед за ней приехали и дети. Резерфорд и другие друзья Капицы обращались к советскому правительству с просьбой разрешить ему выезд для продолжения работы в Англии, но тщетно.

В 1935 году Капице предложили стать директором вновь созданного специально для него Института физических проблем Академии наук СССР, но прежде, чем дать согласие, Капица почти год отказывался от предлагаемого поста. Резерфорд, смирившись с потерей своего выдающегося сотрудника, позволил советским властям купить оборудование лаборатории Монда и отправить его морским путем в СССР. Переговоры, перевоз оборудования и монтаж его в Институте физических проблем заняли несколько лет.

В Институте физических проблем Капица возобновил свои исследования по физике низких температур, в том числе свойств жидкого гелия. Он проектировал установки для сжижения других газов. В частности, в 1938 году Капица усовершенствовал небольшую турбину, очень эффективно сжижавшую воздух. Ему удалось обнаружить необычайное уменьшение вязкости жидкого гелия при охлаждении до температуры ниже 2,17К, при которой он переходит в форму, называемую гелием-2. Утрата вязкости позволяет ему беспрепятственно вытекать через мельчайшие отверстия и даже взбираться по стенкам контейнера, как бы «не чувствуя» действия силы тяжести. Отсутствие вязкости сопровождается также увеличением теплопроводности. Капица назвал открытое им новое явление сверхтекучестью.

Двое из бывших коллег Капицы по Кавендишской лаборатории, Дж.Ф. Аллен А.Д. Мизнер, выполнили аналогичные исследования. Все трое опубликовали статьи с изложением полученных результатов в одном и том же выпуске британского журнала «Нейче». Статья Капицы 1938 года и две другие работы, опубликованные в 1942 году, принадлежат к числу его наиболее важных работ по физике низких температур. Капица, обладавший необычайно высоким авторитетом, смело отстаивал свои взгляды даже во время чисток, проводимых Сталиным в конце 30-х годов. Когда в 1938 году по обвинению в шпионаже в пользу нацистской Германии был арестован Лев Давидович Ландау, Капица добился его освобождения. В своих докладах правительственным уполномоченным Капица открыто критиковал те решения, которые считал неправильными. В октябре 1941 года он привлек внимание общественности, выступив с предупреждением о возможности создания атомной бомбы. Возможно, он был первым из физиков, кто сделал подобное заявление. Впоследствии

Капица отрицал свое участие в работах по созданию как атомной, так и водородной бомб. Имеются вполне убедительные данные, подтверждающие его заявления. Неясно, однако, был ли его отказ продиктован моральными соображениями или расхождением во мнении относительно того, в какой мере предполагавшаяся часть проекта согласуется с традициями и возможностями Института физических проблем. Некоторое время Капица являлся членом Спецкомитета, возглавляемого Л.П.Берией, (кроме П.Л.Капицы из ученых в состав Спецкомитета входил только И.В.Курчатов). На П.Л.Капицу возлагалось решение проблем получения тяжелой воды. Однако установки на заводе в Днепропетровске не обеспечивали предполагавшейся производительности, а вскоре после пуска завода там произошла крупная авария с человеческими жертвами. Это вместе с несколькими заявлениями П.Л.Капицы на заседаниях Спецкомитета о необходимости передать отечественный Атомный проект под международный контроль послужило основанием для вывода П.Л.Капицы из Спецкомитета. Легенды о том, что истинной причиной этого была нецензурная ругань в адрес Л.П.Берии необоснованны. Хотя известно, что П.Л.Капица неоднократно писал Сталину письма с критикой обстановки в Атомном проекте и на этих письмах есть пометки Сталина. У самого Петра Леонидовича характер был далеко не ангельским. Некоторую часть манер он перенял у Э.Резерфорда и по его примеру мог заявить: «Сверхтекучестью занимаюсь я. А вы подберите себе другую тему исследований...» или «Чем вы занимаетесь? Вы что в игрушки ко мне приехали играть?»

В 1946 году у Капицы возникают большие проблемы в Главкислороде, начальником которого он был назначен в годы войны. Зависть и доносы сделали свое дело - 17 августа 1946 года П.Л.Капица был снят с постов начальника Главкислорода и директора Института физических проблем. У себя на даче на Николиной горе он оборудовал небольшую лабораторию и продолжал заниматься исследованиями, получив ряд весьма важных результатов. Петр Леонидович шутил, что он на восемь лет перешел из одного ИФП в другой ИФП, т.е. из Института Физпроблем в Избу физпроблем. В этот период П.Л.Капица пишет несколько писем Сталину по различным вопросам. Известно, что Сталин эти письма читал и два или три раза разговаривал с П.Л.Капицей по телефону. Однако изменений в судьбе П.Л.Капицы не происходило. Через два года после смерти Сталина, в 1955 года, отпала необходимость непосредственного участия Института физических проблем в Атомном проекте, П.Л.Капица был восстановлен на посту директора и пребывал в этой должности до конца жизни.

Послевоенные научные работы Капицы охватывают самые различные области физики, включая гидродинамику тонких слоев жидкости и природу шаровой молнии, но основные его интересы сосредоточиваются на

микроволновых генераторах и изучении различных свойств плазмы. В 50-е годы, работая над созданием микроволнового генератора, названного ниготроном по имени «избы физических проблем» на **Николиной горе** Капица обнаружил, что микроволны большой интенсивности порождают в гелии отчетливо наблюдаемый светящийся разряд. Измеряя температуру в центре гелиевого разряда, он установил, что на расстоянии в несколько миллиметров от границы разряда температура изменяется примерно на 2 000 000 К. Это открытие легло в основу проекта термоядерного реактора с непрерывным подогревом плазмы. Возможно, что такой реактор окажется проще и дешевле, чем термоядерные реакторы с импульсным режимом подогрева, используемые в других экспериментах по термоядерному синтезу. Свою Нобелевскую лекцию 1978 года Петр Леонидович также посвятил вопросам физики плазмы и управляемым термоядерным реакциям, хотя премия ему была присуждена за исследования в области физики низких температур.

Помимо достижений в экспериментальной физике, Капица проявил себя как блестящий администратор и просветитель. Под его руководством Институт физических проблем стал одним из наиболее продуктивных и престижных институтов Академии наук СССР, привлекая многих ведущих физиков страны. Капица принимал участие в создании научно-исследовательского центра неподалеку от Новосибирска – Академгородка, и высшего учебного заведения нового типа – Московского физико-технического института. Построенные Капицей установки для сжижения газов нашли широкое применение в промышленности. Использование кислорода, извлеченного из жидкого воздуха, для кислородного дутья произвело подлинный переворот в советской сталелитейной промышленности.

В 1965 году, впервые после более чем тридцатилетнего перерыва, Капица получил разрешение на выезд из Советского Союза в Данию для получения Международной золотой медали Нильса Бора, присуждаемой Датским обществом инженеров-строителей, электриков и механиков. Там он посетил научные лаборатории и выступил с лекцией по физике высоких энергий. В 1966 году Капица вновь побывал в Англии, в своих старых лабораториях, поделился воспоминаниями о Резерфорде в речи, с которой выступил перед членами Лондонского королевского общества. В 1969 году Капица вместе с женой впервые совершил поездку в Соединенные Штаты.

Капица был удостоен Нобелевской премии по физике в 1978 году «за фундаментальные изобретения и открытия в области физики низких температур». Свою награду он разделил с Арно А. Пензиасом и Робертом В. Вильсоном. Представляя лауреатов, Ламек Хультен из Шведской королевской академии наук заметил: «Капица предстает перед нами как один из величайших экспериментаторов нашего времени, неоспоримый пионер, лидер и мастер в своей области».

В 1927 году во время своего пребывания в Англии Капица женился второй раз. Его женой стала Анна Алексеевна Крылова, дочь знаменитого кораблестроителя, механика и математика Алексея Николаевича Крылова, который по поручению правительства был командирован в Англию для наблюдения за постройкой судов по заказу Советской России. У супругов Капица родились двое сыновей. Оба они впоследствии стали учеными. В молодости Капица, находясь в Кембридже, водил мотоцикл, курил трубку и носил костюмы из твида. Свои английские привычки он сохранил на всю жизнь. В Москве, рядом с Институтом физических проблем, для него был построен коттедж в английском стиле. Одежду и табак он выписывал из Англии. На досуге Капица любил играть в шахматы и ремонтировать старинные часы.

В 1972-1974 годах было установлено, что сверхтекучестью обладает также изотоп гелия- He^3 , при температуре ниже $T_c = 2,6 \cdot 10^{-3} K$ и давлении 34 атм. Переход жидких He^4 и He^3 в сверхтекучие состояния представляет собой фазовый переход второго рода.

Сверхтекучую жидкость нельзя представлять как жидкость, не обладающую вязкостью, ибо как показали эксперименты с крутильными колебаниями диска погруженного в $He II$, затухание колебаний, вызываемое вязкостью при температуре, не слишком далекой от лямбда – точки, мало отличается от затухания аналогичных колебаний в $He I$.

Первый вариант теории сверхтекучести $He II$ был создан Л.Д. Ландау в 1941 году. Эта теория, названная двух жидкостной гидродинамикой, основана на представлении о том, что свойства $He II$ при низких температурах как слабо возбужденной квантовой системы обусловлены наличием в нем элементарных возбуждений (квазичастиц).

Ландау Лев Давыдович (22.01.1908 – 01.04.1968) выдающийся физик – теоретик, академик (1946). Родился в г. Баку. Окончил Ленинградский университет (1927). В 1927-1932 годах аспирант, научный сотрудник ЛФТИ. В 1932-1937 годах профессор ряда вузов и НИИ в Харькове. С 1937 года зав отделом теоретической физики Института физических проблем АН СССР, одновременно профессор МГУ и МФТИ. Работы посвящены квантовой механике, физике конденсированного состояния, физике элементарных частиц, физике плазмы. Создал теорию фазовых переходов второго рода (1935-1937), первые теории сверхтекучести гелия II (1940-1941), сверхпроводимости (совместно с В.Л. Гинзбургом 1950), квантовых ферми – жидкостей (1956), за что удостоен Нобелевской премии 1962 году. Разработал теорию диамагнетизма свободных электронов (1930), ввел понятие антиферромагнетизма (1933), развил теорию доменной структуры (совместно с Е.М. Лифшицем 1935). В 1936 году предложил кинетическое уравнение для плазмы. В 1953-1955 годах разработал гидродинамическую модель множественного рождения адронов.

Автор многотомного курса теоретической физики (Ленинская премия 1962). Герой Социалистического труда (1954). Государственные премии СССР (1946, 1949, 1953). Основатель и руководитель крупной научной школы.

Льву Давидовичу Ландау было всего 54 года (без 2-х недель), когда 7 января 1962 года он попал в автомобильную катастрофу по дороге в Дубну. После этого Ландау прожил еще шесть лет, но тяжело больным человеком и работать совсем не мог. Еще один год из его короткой жизни вырвала тюрьма. 27 апреля 1938 года он был арестован по доносам и выбитым на допросах показаниям сотрудников УФТИ. В тюрьме Ландау был близок к гибели, так как не мог есть кашу и другую тюремную пищу. Спас Ландау Капица, написавший письма Сталину, Молотову, Берия. Письмо Сталину в защиту Ландау прислал также Нильс Бор. 28 апреля 1938 года Ландау был освобожден из заключения «под личное поручительство тов. Капицы». Дело Ландау было прекращено «за отсутствием состава преступления» лишь 23 июля 1990 года. Заслуги П.Л.Капицы в освобождении Л.Д.Ландау бесспорны и заслуживают самой высокой оценки. Но, как отмечает в своих воспоминаниях В.Л.Гинзбург, «это не давало Капице права обращаться грубо с Ландау, чему я был сам неоднократно свидетелем. На обращенный к Ландау вопрос, как он может терпеть такую грубость, Ландау отвечал: «Капица перевел меня из отрицательного состояния в положительное, и поэтому я бессилён ему возражать». Вообще Ландау часто заявлял, что после тюрьмы он стал «христианином», т.е. не спорит с начальством и т.п.» По-видимому, отпечатком тюремного заключения является и мрачная шутка Л.Д.: «Лучше побыть пять минут трусом, чем всю оставшуюся жизнь мертвым...». В тюрьме у Ландау не было возможности писать, поэтому он приучился делать вычисления в уме. В частности, в тюрьме он преуспел в выводе некоторых гидродинамических соотношений. Хотя они оказались известными, но пригодились впоследствии при написании тома посвященного гидродинамике в курсе теоретической физики.

Будучи «истинным» теоретиком Ландау с трудом «умещался в экспериментальной лаборатории». Как вспоминает Э.Л.Андроникашвили: «Некоторые из нас просили его положить руки на спинку стула и прижимали их лопатками. Только так и можно было работать в его присутствии».

Общеизвестна сдержанность Л.Д.Ландау в публикации своих работ-собрание трудов, выпущенное издательством «Наука» в 1969 году, включает 98 научных статей, не вошло в это издание еще 17 работ, показавшихся комиссии недостаточно весомыми (Многие рядовые доктора и кандидаты наук в настоящее время могут похвалиться 150-200 или даже 300 публикациями.) Лев Давидович считал, что ученому его ранга не следует размениваться на мелочи. (Близкие друзья Л.Д., как например, В.Л.Гинзбург, утверждают, что основной причиной малого числа статей является ужасный почерк Л.Д. и его отвращение к писанию, так что даже те работы, в которых не было соавторов, за Ландау написаны другими людьми, под его диктовку разумеется). Соавторов научных статей Ландау

насчитывается 26; с некоторыми (И.М.Халатников, И.Я.Померанчук, А.А.Абрикосов и другие) было написано 7-10 статей, однако чаще появлялась одна совместная статья, а затем сотрудничество прекращалось, причем отношения между соавторами могли стать весьма холодными и даже враждебными (классический пример – Д.Д.Иваненко). В большинстве своем соавторами Ландау были его ученики, но имело также место и сотрудничество с крупными учеными, как отечественными (Я.Б.Зельдович), так и зарубежными (Р.Пайерлс, С.Пекар, Е.Теллер). Не все ученики Ландау удостоились чести иметь совместные работы с учителем, причем это совершенно не зависит от их талантливости, просто так сложилось (А.Б.Мигдал, М.Л.Тер-Микаелян, Э.А.Манькин и другие). Соавторами учебников Л.Д.Ландау были Е.М.Лифшиц, Я.А.Сморodinский, А.И.Ахиезер, А.И.Китайгородский, Ю.Б.Румер, А.С.Компанеец.

В оценке своих достижений Ландау был также достаточно самокритичен. В логарифмической шкале оценки достижений физиков себе он отводил класс 1,5, тогда как наивысший класс 0,5 занимал Эйнштейн, а Бор, Гейзенберг, Дирак входили в класс 1,0. (Хотя в лекциях для студентов Лев Давидович мог сказать, что «физикой на Земле занимались всего семь человек: Эйнштейн, Бор, Гейзенберг, Дирак, Паули, Гамов и я» – т.е. на Ландау вся физика заканчивается и нечего рассчитывать ей заниматься. Какова доля правды в этой шутке, каждый может для себя решить сам.) На вопрос В.Л.Гинзбурга не думает ли он, что мог бы сделать больше, решить более трудные проблемы Лев Давидович сразу же очень четко ответил: «Нет, это неверно, я сделал все, что мог».

Ошибки Ландау, а также факты его личной жизни мы обсуждать не будем, отсылая желающих к воспоминаниям близких друзей Льва Давидовича, как например, В.Л.Гинзбург, и его вдовы К. Дробанцевой – Ландау. Заметим лишь, что с многими положениями и оценками последней согласиться нельзя. Один из нас (Н.Д.), «пересекавшийся» в аспирантуре МГУ с Игорем Ландау, полагает, что мемуары написаны не его мамой, а каким-нибудь бойким журналистом новой родины Игоря, с целью заработать деньги на «жареных фактах».

Несомненно, Лев Давидович Ландау, является одной из ярчайших звезд на небосводе теоретической физики. А если еще учесть созданную им научную школу и его фундаментальный курс теоретической физики, то равных ему по «блеску» указать трудно, если вообще возможно.

Гелий II можно представить состоящим из двух взаимопроникающих компонент: нормальной и сверхтекучей. Нормальная компонента при температурах, не слишком близких к T_λ представляет собой совокупность квазичастиц двух типов – фотонов и ротонов. При $T=0$ плотность нормальной компоненты равна нулю, поскольку при абсолютном нуле температуры любая квантовая система находится в основном состоянии и возбуждения (квазичастицы) в ней отсутствуют. При температурах от

абсолютного нуля до EMBED Equation.3 $T = 1,7 - 1,8K$ совокупность элементарных возбуждений в *He II* можно рассматривать как идеальный газ квазичастиц. С дальнейшим приближением температуры к T_λ взаимодействие квазичастиц между собой и стенками сосуда растет и модель идеального газа становится неприменимой, что и обуславливает вязкость нормальной компоненты. Сверхтекучая компонента *He II* вязкостью вообще не обладает и свободно протекает через узкие щели и капилляры. Отношение плотности нормальной компоненты к полной плотности (сумме плотностей нормальной и сверхтекучей компонент) равно нулю при $T = 0$ и быстро возрастает до единицы при $T = T_\lambda$.

Согласно теории Л.Д. Ландау сверхтекучесть исчезает тогда, когда скорость движения жидкости превышает критическое значение, при котором начинается спонтанное образование ротонов. При этом сверхтекучая компонента теряет импульс, равный импульсу испускаемых ротонов и тормозится. Однако, экспериментальное значение критической скорости оказалось значительно меньше теоретического.

С микроскопической точки зрения сверхтекучее состояние жидкости, состоящей из атомов с целым спином (бозонов), связано с переходом значительного числа атомов в состояние с нулевым импульсом (Бозе – Эйнштейна конденсацию). Состояние всех частиц Бозе – Эйнштейна конденсата описывается одной и той же волновой функцией $\psi = \sqrt{n_0} \exp(i\varphi)$, где n_0 - плотность конденсата. Появление нового типа движения жидкости – когерентного движения макроскопического числа частиц с одной фазой φ приводит к двухжидкостной гидродинамике (Н.Н. Боголюбов, 1947, 1963). Для слабого взаимодействия между атомами плотности конденсата и сверхтекучей компоненты примерно равны. В реальном *He II* плотность конденсата n_0 (вследствие взаимодействия атомов) составляет только несколько процентов ρ_s , тем не менее сверхтекучая компонента движется потенциально (ее скорость v_s связана с фазой φ соотношением $v_s = \frac{\hbar}{m} \nabla \varphi$) и не испытывает сопротивления со стороны обтекаемой ею предметов и стенок канала или сосуда.

Конденсатная волновая функция должна быть непрерывной, поэтому ее фаза при обходе по замкнутому контуру может меняться лишь на $2\pi N$, где N - целое число. Это означает, что циркуляция скорости сверхтекучей компоненты по любому замкнутому контуру может принимать лишь дискретные значения $\frac{2\pi\hbar N}{m}$. Тем самым, для сверхтекучей жидкости появляются особые макроскопические квантовые свойства:

- при течении сверхтекучей жидкости по замкнутому в кольцо каналу циркуляция скорости v_s квантуется с квантом циркуляции $\frac{\hbar}{m}$. Под влиянием внешнего воздействия скорость течения не может уменьшаться

непрерывно, но только скачком. В процессе перехода из состояния с N квантами циркуляции к течению с $N-1$ квантами требуется разрушить сверхтекучее состояние в некоторой области (обратить ρ_s в нуль), преодолевая при этом большой потенциальный барьер. Таким образом, течение в замкнутом канале чрезвычайно устойчиво.

- в сверхтекучей компоненте могут существовать квантованные вихри (Л. Онсагер, 1948; Р. Фейнман, 1955) с циркуляцией вдоль оси вихря принимающей дискретные значения. В отличие от вихрей в обычной жидкости квантованные вихри устойчивы и не исчезают под влиянием вязкости нормальной компоненты. На оси этих вихрей ψ , а вместе с ней и ρ_s обращаются в нуль, так что квантованные вихри осуществляют взаимодействие между сверхтекучей и нормальной компонентами. Их рождение приводит к хотя и слабому, но конечному затуханию потока сверхтекучей жидкости в замкнутом канале. При некоторой скорости движения сверхтекучей компоненты квантованные вихри начинают образовываться столь интенсивно, что появляется трение с нормальной компонентой или стенками сосуда и сверхтекучесть исчезает. Данная критическая скорость меньше предсказываемой теорией Л.Д. Ландау и близка к экспериментально наблюдаемой. Квантованные вихри появляются и при вращении сосуда с жидким гелием, приводя к изменению формы мениска к типичной для любой жидкости.

Фейнман Ричард Филипс (11.05.1918 – 15.02.1988) американский физик – теоретик, один из создателей квантовой электродинамики. Родился в Нью-Йорке. Окончил Массачусетский технологический институт (1939). Работал в Принстонском университете (1940-1943), в Лос-Аламосской лаборатории (1943-1945), в Корнельском университете (1945-1950). С 1950 года профессор Калифорнийского технологического института. Работы посвящены квантовой теории поля, квантовой электродинамике, физике элементарных частиц, физике конденсированного состояния, теории гравитации. В 1948 году независимо от Ю. Швингера и С. Томонаги разработал квантовую электродинамику (Нобелевская премия 1965 года), в 1949 году предложил метод диаграмм, названных его именем, в 1958 году вместе с М. Гелл-Манном создал теорию слабых взаимодействий. Развил теорию квантовых вихрей (1955) и теорию сверхтекучести жидкого He^4 . Для столкновений частиц высокой энергии предложил концепцию масштабной инвариантности (скейлинг) и партонную модель. Автор известного курса «Фейнмановские лекции по физике»

Оригинальность мышления и артистизм Фейнмана как лектора оказали влияние на целое поколение студентов-физиков. Его метод интуитивного угадывания формулы и последующего доказательства ее правильности находит больше подражателей, чем критиков. Влияние как его теорий, так и его личности ощущается в каждом разделе современной физики.

Фейнман был трижды женат. Арлен Х. Гринбаум, с которой он вступил в брак в 1941 году, умерла от туберкулеза в 1945 году, когда Фейнман был в Лос-Аламосе. Его брак с Мэри Луиз Белл, заключенный в 1952 году, закончился разводом. В 1960 году он женился в Англии на Гвенет Ховарт. У них родились сын и дочь.

Искренний и непочтительный к авторитетам, Фейнман входил в состав президентской комиссии, расследовавшей обстоятельства взрыва космического корабля многоразового использования «Челенджер» в 1986 году. Он составил собственный тринадцатистраничный отчет, в котором критиковал ответственных сотрудников Национального управления авиации и космических исследований (НАСА) за то, что те дали «одурачить себя», не заметив существенных недостатков в конструкции космического корабля. Человек неуемной любознательности и разносторонних интересов, Фейнман с удовольствием играл на барабанах «бонго», изучал японский язык, рисовал и занимался живописью, принимал участие в дешифровке текстов майя и проявлял живой интерес к чудесам парапсихологии, относясь к ним, однако, с изрядной долей скепсиса.

Помимо Нобелевской премии, Фейнман был удостоен премии Альберта Эйнштейна Мемориального фонда Льюиса и Розы Страусе (1954), премии по физике Эрнеста Орландо Лоуренса Комиссии по атомной энергии Соединенных Штатов Америки (1962) и международной золотой медали Нильса Бора Датского общества инженеров-строителей, электриков и механиков (1973). Фейнман был членом Американского физического общества, Бразильской академии наук и Лондонского королевского общества. Он был избран членом Национальной академии наук США, но позднее вышел в отставку.

Существенными особенностями отличается сверхтекучесть He^3 . Атомы He^3 фермионы (He^3 - ферми – жидкость) образуют куперовские пары с параллельным спином $S=1$ и орбитальным моментом $L=1$, которые испытывают Бозе – Эйнштейна конденсацию. Энергия связи куперовских пар в He^3 мала, поэтому его сверхтекучесть наблюдается при температурах в несколько мК. Столь низкие температуры достигаются применением эффекта Померанчука и магнитного охлаждения. В отличие от He^4 на диаграмме состояния He^3 две сверхтекучие фазы А и В. Переход нормальной жидкости в любую из этих фаз есть фазовый переход II рода, а переход между фазами – переход I рода. Фазы различаются по структуре волновой функции куперовской пары, которая определяет как сверхтекучие так и магнитные свойства фазы. В фазе В нет выделенных направлений спина и импульса куперовских пар, по своим сверхтекучим свойствам она эквивалентна He II, а по магнитным свойствам – изотропному антиферромагнетику. В фазе А

куперовские пары имеют одинаковое направление орбитального момента импульса. Как следствие, появляется анизотропия сверхтекучих и антиферромагнитных свойств. Торможение в канале для фазы А также отличается от имеющейся He II ситуации тем, что вклад в него дают не только квантованные вихри, но также осцилляция вектора орбитального момента и точечные дефекты на стенках канала - буджумы. (Название обязано «Охоте на Снарка» Льюиса Кэрролла). По своим магнитным свойствам фаза А представляет собой одноосный антиферромагнетик. Кроме того, поскольку орбитальный момент куперовских пар частично передается электронам атомов He^3 , фаза А обладает также слабым ($\sim 10^{-11} \mu_B/\text{атом}$) спонтанным магнитным моментом, направленным по \vec{l} и является единственным известным жидким ферромагнетиком.



Рис. 2. Фазовая диаграмма гелия-3.

В сверхтекучей жидкости наблюдается целый ряд других весьма интересных эффектов, таких как, термомеханический эффект (разность давлений, возникающая при нагревании одного из сообщающихся через капилляр сосудов), обратный ему механокалорический эффект и другие. Интересными свойствами обладает сверхтекучая пленка гелия,

образующаяся на твердой стенке сосуда. Она способна, например, выравнивать уровни He II в сосудах, имеющих общую стенку.

Сверхпроводимость. Сверхпроводимость представляет собой комплекс явлений в проводящих материалах при низких температурах и, прежде всего, скачкообразное падение электрического сопротивления до нуля при охлаждении ниже критической температуры T_k , характерной для данного материала. Сверхпроводимость обнаружена у 25 химических элементов (металлов), большого числа сплавов и интерметаллических соединений, некоторых полупроводников, полимеров, а также керамик. Если исключить керамики и сопутствующую им высоко температурную сверхпроводимость, как отдельное явление со своим специфическим механизмом, к обсуждению которого мы приступим несколько позже, то рекордно высокой критической температурой ($T_k \approx 23K$) обладает соединение Nb_3Ge .

Скачкообразное исчезновение сопротивления ртути при понижении температуры впервые наблюдал голландский физик Хейке Камерлинг-Оннес в 1911 г. при температуре $T_k = 4,15K$. При этом ширина области перехода не превышает $10^{-3}K$, т.е. переход является весьма резким.

Голландский физик Хейке Камерлинг-Оннес (21.09.1853 – 21.02.1926) родился в Гронингене на севере Нидерландов. Его отец Харм Камерлинг-Оннес был преуспевающим владельцем кирпичного завода, мать, урожденная Анна Гердина Коерс, была дочерью архитектора.

По окончании средней школы Камерлинг-Оннес в 1870 году поступил в Гронингенский университет, где изучал математику и физику. Степень кандидата (примерно эквивалентную степени бакалавра) он получил в 1871 году. Три семестра Камерлинг-Оннес провел в Гейдельбергском университете (Германия), где его занятиями руководили химик Роберт Бунзен и физик Густав Кирхгоф. В 1873 году Камерлинг-Оннес возвратился в Гронинген. Через шесть лет он блестяще защитил докторскую диссертацию, в которой предложил новое доказательство вращения Земли.

С 1878 по 1882 год Камерлинг-Оннес читал лекции в Политехническом училище (позднее преобразованном в Технический университет) Дельфта. Внимание Камерлинг-Оннеса привлекала теория газов Йоханнеса Ван-дер-Ваальса, устанавливающая соотношение между давлением, температурой и объемом. Она позволяла учесть различия в поведении реальных и идеальных газов. В то время Ван-дер-Ваальс преподавал в Амстердаме, и Камерлинг-Оннес вступил с ним в переписку по поводу молекулярной

теории.

В 1882 году, в возрасте двадцати девяти лет, Камерлинг-Оннес получил назначение на должность профессора экспериментальной физики Лейденского университета и стал во главе физической лаборатории этого университета. В своей вступительной лекции Камерлинг-Оннес провозгласил принцип, которым неукоснительно руководствовался на протяжении сорока двух лет своего пребывания в Лейденском университете: «Через измерение к знанию». По мнению Камерлинг-Оннеса, физические лаборатории должны производить количественные измерения и ставить качественные эксперименты; теоретические описания должны подкрепляться точными измерениями, производимыми с астрономической точностью.

Согласно теории соответственных состояний Ван-дер-Ваальса, все газы ведут себя одинаково, если единицы давления и температуры выбраны с учетом слабых сил притяжения между молекулами. Камерлинг-Оннес считал, что исследование поведения газов при низких температурах может дать важную информацию для проверки теории соответственных состояний. Для достижения низких температур необходимо сжижать газы. Камерлинг-Оннес выбрал темой для работы своей лаборатории узкую область криогеники – исследование низкотемпературных эффектов. Он построил крупный завод по сжижению газов для получения больших количеств низкотемпературных жидкостей – кислорода, азота и воздуха. Эти жидкости были необходимы для проведения экспериментов по изучению свойств материалов и достижения еще более низких температур. Чтобы подготовить квалифицированных ассистентов, Камерлинг-Оннес в 1909 году открыл училище для механиков и стеклодувов. Вскоре выпускников лейденского училища можно было встретить в физических лабораториях всего мира. Лаборатория Камерлинг-Оннеса стала образцом для научно-исследовательских институтов XX века.

Хотя шотландский ученый Джеймс Дьюар получил жидкий водород в 1898 году, только Камерлинг-Оннесу удалось наладить получение жидкого водорода в значительных количествах. Его заводская установка производила 4 литра жидкого водорода в час. Для создания установки потребовалось все искусство подготовленных Камерлинг-Оннесом техников: механиков – для создания насосов, стеклодувов – для изготовления прозрачных сосудов, сквозь стенки которых можно было бы наблюдать за поведением веществ при низких температурах.

Через два года Камерлинг-Оннесу впервые удалось получить жидкий гелий при температуре всего лишь на 4° выше абсолютного нуля. Некоторые ученые сомневались, что это вообще достижимо. «Я был вне себя от радости, когда смог продемонстрировать жидкий гелий моему другу Ван-

дер-Ваальсу, чья теория была моей путеводной нитью, позволившей довести сжижение до конца», – вспоминал впоследствии Камерлинг-Оннес С помощью жидкого гелия Камерлинг-Оннесу удалось достичь еще более низких температур: 1,38 К в 1909 году и 1,04 К в 1910-м. Однако основной его заботой оставалось исследование свойств веществ при столь низких температурах. Он изучал спектры поглощения элементов, фосфоресценцию различных соединений, вязкость сжиженных газов и магнитные свойства веществ. Поскольку температура является мерой случайного движения молекул вещества, а это затемняет суть некоторых явлений, понижение температуры может, по выражению Камерлинг-Оннеса, помочь «приподнять завесу, которую простирают над внутренним миром атомов и электронов тепловые движения при обычных температурах».

Свое наиболее поразительное открытие Камерлинг-Оннес сделал в 1911 году. Он обнаружил, что при низких температурах электрическое сопротивление некоторых металлов полностью исчезает. Это явление Камерлинг-Оннес назвал сверхпроводимостью. Камерлинг-Оннес предположил, что объяснение сверхпроводимости будет дано квантовой теорией. В 1957 году Джон Бардин, Леон Купер и Дж. Роберт Шриффер предложили теоретическое объяснение явления сверхпроводимости.

Камерлинг-Оннес был удостоен Нобелевской премии по физике 1913 года «за исследования свойств вещества при низких температурах, которые привели к производству жидкого гелия». Представляя лауреата, Теодор Нордстрем из Шведской королевской академии наук сказал, что «достижение столь низких температур имеет огромное значение для физических исследований и работы Камерлинг-Оннеса внесут свой вклад в новые теории электрона».

*Камерлинг-Оннес, снискавший всеобщую любовь и заслуживший почетное прозвище Господин Абсолютный Нуль, многое сделал для развития международного сотрудничества в области науки. Он охотно приглашал иностранных ученых поработать в своей лаборатории. Основанный им журнал «Сообщения из физической лаборатории Лейденского университета» (*Communications From the Physical Laboratory of the University of Leiden*) стал самым авторитетным изданием по физике низких температур. Камерлинг-Оннес принимал деятельное участие в разработке методов использования низких температур: хранении пищевых продуктов; создании вагонов-рефрижераторов и производстве льда.*

В 1887 году Камерлинг-Оннес вступил в брак с Элизабет Билефельд. У супругов родился один сын. Интересы Камерлинг-Оннеса не замыкались в стенах его лаборатории. Он был преданным семьянином, и его коллеги отзывались о нем как о человеке большого обаяния и скромности. Во время первой мировой войны он принимал участие в организации помощи

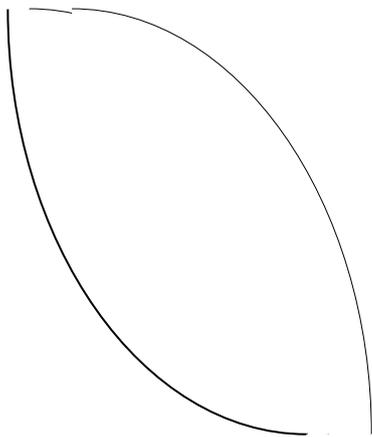
голодающим детям различных стран. Грандиозность его свершений и интенсивность научной деятельности находились в явном несоответствии с хрупким здоровьем, которым он отличался на протяжении всей своей жизни. После непродолжительной болезни Камерлинг-Оннес скончался в Лейдене 21 февраля 1926 года.

В числе его многочисленных наград были золотая медаль Маттеуччи Национальной академии наук Италии, медаль Румфорда Лондонского королевского общества и медаль Франклина Франклиновского института. Он был почетным доктором Берлинского университета. Когда ему не исполнилось и тридцати, он был избран членом Королевской академии наук в Амстердаме. Камерлинг-Оннес состоял членом академий наук Копенгагена, Геттингена, Галле, Упсала, Турина

Интересно, что непосредственное измерение электросопротивления ртути проводил Г.Холст (квалифицированный физик, в дальнейшем - профессор Лейденского университета), который и наблюдал первым падение сопротивления до нуля. Так как Лейденская лаборатория владела монополией на жидкий гелий вплоть до 1923 года, то даже повторить опыты Камерлинг-Оннеса никто не мог, и он продолжал свои исследования в одиночку (по крайней мере, имя Холста нигде не упоминалось). Вскоре вслед за ртутью были открыты и другие сверхпроводники: олово ($T_c = 3,69$ К), свинец ($T_c = 7,26$ К) и т.д. Первый сверхпроводник вне Лейдена был открыт лишь в 1928 году. В 1914 году выяснилось, что существует критическое для сверхпроводимости магнитное поле $H_c(T)$, величина которого при $T = 0$ составляет 411 Э для ртути и 803 Э для свинца. Камерлинг-Оннес был близок к открытию изотопического эффекта (в 1922 году) и эффекта Мейснера (в 1924 году). Но так как изотопический сдвиг T_c в использованных Камерлинг-Оннесом изотопах свинца составлял всего лишь $\Delta T_c \gg 0,01$ К, то изотопический эффект он не имел экспериментальных возможностей обнаружить. А наблюдать эффект Мейснера в свинцовом шаре Камерлинг-Оннесу не позволило то обстоятельство, что он изучал полый шар, экономя дефицитный жидкий гелий. Таким образом, эффект Мейснера был открыт лишь в 1933 году.

Отсутствие сопротивления в сверхпроводниках позволяет возбуждать в них незатухающие электрические токи. В эксперименте С. Коллинза сверхпроводящее кольцо с наведенным током поддерживалось более двух с половиной лет при температуре ниже критической без какого-либо изменения тока за этот период. Тем самым, удельное сопротивление сверхпроводника меньше 10^{-21} Ом·см. (тогда как удельное сопротивление чистой меди или серебра при данной температуре составляет около 10^{-9} Ом см.). Другой особенностью сверхпроводников является выталкивание из них магнитного поля и идеальный диамагнетизм (см. Рис. 2). Данный эффект был обнаружен немецкими физиками В. Мейснером и Р. Оксенфельдом. Эффект

Мейснера связан с тем, что в поверхностном слое сверхпроводника толщиной $10^{-5} - 10^{-6} \text{ см}$ в магнитном поле наводятся круговые незатухающие токи, сила которых такова, что их магнитное поле в точности компенсирует внешнее во всей толще сверхпроводника. Подобная ситуация может иметь лишь до некоторого значения напряженности внешнего магнитного поля H_c , при котором поле проникает в сверхпроводник и сверхпроводящее состояние разрушается.



$$H < H_c$$

нормальное состояние. Критическое поле H_c зависит от температуры. Оно максимально при $T=0$ и монотонно убывает до нуля при $T \rightarrow T_c$ (см. фазовую диаграмму на Рис. 4).



Рис. 4. Зависимость критического поля от температуры

Картина разрушения сверхпроводимости магнитным полем у сверхпроводников 2-го рода значительно сложнее – уменьшение магнитного момента происходит постепенно на протяжении значительного интервала полей от нижнего значения $H_{к1}$, когда поле только начинает проникать в образец, до $H_{к23}$, при котором происходит полное разрушение сверхпроводящего состояния, верхнее значение критической напряженности $H_{к2}$ довольно велико до 10^5 э. Различная картина разрушения сверхпроводимости магнитным полем для сверхпроводников 1-го и 2-го рода может быть объяснена с позиций термодинамики. В сверхпроводниках 1-го рода поверхностная энергия положительна, так что появление границы раздела между нормальной и сверхпроводящей фазами внутри сверхпроводника требует энергетических затрат. Тогда как в сверхпроводнике 2-го рода поверхностная энергия отрицательна и уже при $H < H_{к1}$ энергетически выгодным является образование внутри сверхпроводника тонких областей нормальной фазы в форме нитей, имеющих толщину порядка глубины проникновения магнитного поля, и ориентированных вдоль поля. При увеличении напряженности внешнего поля концентрация нитей возрастает, что и приводит к постепенному уменьшению магнитного момента.

Первая теория сверхпроводимости была предложена в 1934 году немецким ученым Гейнцем и Фрицем Лондонами работавшими в Англии. Они предложили к уравнениям Максвелла добавить два следующих соотношения:

$$\vec{E} = \frac{4\pi\lambda_L}{c^2} \vec{j} \qquad \frac{4\pi\lambda_L^2}{c} r_0 \vec{j} + \vec{H} = 0 \qquad (1)$$

где λ_L - некоторый параметр, имеющий размерность длины.

Первое из этих уравнений описывает идеальный проводник с нулевым сопротивлением, а второе магнитное поле в сверхпроводнике. Таким образом, обращение сопротивления в нуль и эффект Мейснера являются различными и независимыми эффектами. Кроме того, картина магнитного поля для идеального проводника без эффекта Мейснера отличается от картины магнитного поля в сверхпроводнике (см. Рис. 2). Из уравнений Максвелла и соотношений (1) следует уравнение для напряженности магнитного поля

$$\Delta \vec{H} = \vec{H} / \lambda_L^2 \quad (2)$$

Его решение для полупространства $x \geq 0$ имеет вид

$$\vec{H} = \vec{H}(0) \exp\left(-x / \lambda_L\right) \quad (3)$$

Таким образом, магнитное поле экспоненциально убывает при проникновении вглубь сверхпроводника и λ_L можно интерпретировать как глубину проникновения. Из соображений размерности $\lambda_L \sim \sqrt{\frac{mc^2}{4\pi ne^2}}$ и при плотности электронов проводимости, соответствующей одному электрону на атом, $\lambda_L \sim 10^{-6}$ см. Можно показать, что уравнение вида (2) и экспоненциально убывающее решение вида (3) будут иметь место и для $\dot{\vec{H}}$, что является следствием двух условий (1). Если же оставить из них только первое (идеальный проводник), то уравнение (2) и решение (3) сохраняются только для $\dot{\vec{H}}$, но не для \vec{H} . Таким образом, идеальная проводимость и идеальный диамагнетизм совершенно независимые явления.

Как показали дальнейшие теоретические исследования волновая функция системы электронов в модели Лондонов является жесткой, т.е. не изменяется при наложении внешнего магнитного поля.

Новый шаг в теоретическом объяснении явления сверхпроводимости был сделан в 1950 году В.Л. Гинзбургом и Л.Д. Ландау, которые отказались от абсолютной жесткости сверхпроводящей волновой функции Ψ (или параметры упорядочения по их терминологии) и из термодинамических соображений получили систему связанных нелинейных уравнений для Ψ (параметра упорядочения) и \vec{A} (вектор потенциала электромагнитного поля в сверхпроводнике). Для глубины проникновения магнитного поля в

сверхпроводник теория давала выражение $\lambda = mc^2 / 4\pi e_{\phi}^2 \Psi^2$. В.Л. Гинзбургу и Л.Д. Ландау почему-то не пришла мысль о возможности Бозе – Эйнштейна конденсации вследствие спаривания электронов, они положили $e_{\phi} = e$ ибо этот заряд, как сказано в оригинальной работе «нет оснований считать отличным от заряда электрона». Если бы было взято правильное значение $e_{\phi} = 2e$, указывающее на то, что носителями тока в сверхпроводнике являются пары электронов, тогда параметр упорядочения Ψ получал бы

правильное истолкование волновой функции конденсата и микроскопическая теория сверхпроводимости была бы создана уже в 1950 году. Но этого не было сделано и, так или иначе, теория Ландау – Гинзбурга осталась полуфеноменологической. После создания микроскопической теории сверхпроводимости Л.П. Горьков обобщил теорию Ландау – Гинзбурга на микроскопическом уровне, а А.А. Абрикосов развил ее для сверхпроводников 2-го рода. Поэтому в литературе данную теорию часто называют ГЛАГ – теорией по первым буквам фамилий исследователей. Значимость этой теории для развития представлений о феномене сверхпроводимости была подтверждена присуждением Нобелевской премии 2004 г. В.Л. Гинзбургу и А.А. Абрикосову. Л.Д. Ландау и Л.П. Горьков до триумфа своих исследований не дожили.

Гинзбург Виталий Лазаревич — российский физик-теоретик, академик с 1966 года, член-корреспондент с 1953 года. Родился 4 октября 1916 года в Москве. Окончил Московский университет (1938). С 1940 года работает в теоретическом отделе Физического института АН СССР (с 1971 года – заведующий отделом), в 1945 —68 годах также профессор Горьковского ун-та, с 1968 года — Московского физико-технического института.

Научные работы посвящены квантовой электродинамике, физике элементарных частиц, теории излучения, оптике (рассеяние света, кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии), теории конденсированных сред, физике плазмы, радиофизике, радиоастрономии, астрофизике. В 1940 году разработал квантовую теорию эффекта Вавилова — Черенкова. Совместно с И.М. Франком предсказал (1946) переходное излучение. Создал термодинамическую теорию сегнетоэлектрических явлений (1945) и указал на связь сегнетоэлектрического перехода с существованием «мягкой моды» оптических колебаний решетки (1949).

Совместно с Л.Д. Ландау построил полуфеноменологическую теорию сверхпроводимости (1950), с Л.П. Питаевским — полуфеноменологическую теорию сверхтекучести (1958). В теории фазовых переходов II рода вывел (1960) критерий применимости теории среднего поля (критерий Гинзбурга). С 1964 года занимается разработкой проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. За совокупность этих работ удостоен Нобелевской премии 2003 года.

Астрономические работы посвящены вопросам происхождения космических лучей, радиоастрономии, релятивистской астрофизике. В 1946 году, в период зарождения радиоастрономии, высказал гипотезы о существовании сильного радиоизлучения от внешних областей короны Солнца и о тормозном механизме радиоизлучения спокойного Солнца. Обе

гипотезы были впоследствии подтверждены наблюдениями. В 1952 году выдвинул гипотезу о магнитотормозной природе повышенного радиоизлучения источников, расположенных над солнечными пятнами, которая успешно была применена при объяснении природы различных компонентов солнечного радиоизлучения. В 1958 году исследовал совместно с В.В.Железняковым проблему распространения и выхода электромагнитных волн из плазмы солнечной короны и связанную с ней проблему поляризации солнечного радиоизлучения. В том же году сформулировал теорию спорадического радиоизлучения Солнца. Предложил ряд новых методов радиоастрономических исследований, среди них метод изучения структуры дискретных источников путем наблюдения дифракции их излучения на крае Луны, метод исследования космического пространства по наблюдению поворота плоскости поляризации и деполяризации излучения радиоисточников.

К астрофизике космических лучей Гинзбург обратился в 1951 году. Установил связь между характеристиками электронного компонента космических лучей и интенсивностью производимого ими в галактических магнитных полях магнитотормозного радиоизлучения. Это позволило по радиоастрономическим данным судить о релятивистских электронах, о протонах и ядрах космических лучей в удаленных областях Вселенной. Выполнил первые исследования роли плазменных эффектов при движении частиц в космическом пространстве, а именно возбуждения и раскачки волн в космической плазме и обратного влияния этих волн на потоки космических лучей. Одним из первых Гинзбург оценил значение гамма- и рентгеновской астрономии и приложил много сил для их развития. В частности, его работы показали, что гамма-астрономия может дать важные сведения о протонно-ядерной компоненте космических лучей.

В работах по проблеме гравитационного коллапса показал в 1964 году, что магнитное поле звезды должно сильно увеличиваться, когда в результате сжатия она превращается в нейтронную звезду (именно таким образом было объяснено сильное магнитное поле у открытых впоследствии пульсаров). Установил совместно с Л.М. Озерным, что магнитное поле при коллапсе звезды вначале сильно возрастает, а затем, по мере приближения поверхности звезды к сфере Шварцшильда, исчезает.

В 1965 году пришел к выводу, что межгалактический газ, несмотря на расширение Вселенной, может иметь в настоящее время весьма высокую температуру и степень ионизации вследствие нагрева его активными галактиками посредством ударных волн, космических лучей и т.п. В 1971 году указал на важную роль квантовых флуктуации гравитационного поля в общей теории относительности и космологии. В 1969 – 1975 годах выполнил исследования по теории радиоизлучения пульсаров, по проблеме их атмосферы.

Во второй части отечественного атомного проекта, создании термоядерных зарядов, В.Л.Гинзбургом была высказана одна из трех основополагающих идей – использование в качестве термоядерного горючего дейтерида лития, названного им «Лидочка». Являясь заместителем И.Е.Тамма по теоретическому отделу ФИАН, Гинзбург принимал активное участие в работах группы И.Е.Тамма, в том числе и по термоядерным проблемам. Однако по ряду причин непосредственного участия в работе КБ-11 Виталий Лазаревич не принимал и в Приволжскую контору (Саров) не выезжал. После успешного испытания Сахаровской слойки РДС-6с В.Л.Гинзбург был награжден орденом Ленина и Сталинской премией I-й степени.

Создал научные школы по космофизике и твердому телу в Москве и по радиофизике в Горьком.

В 1946 году Виталий Лазаревич женился на репрессированной Нине Ивановне Ермаковой (в 1956 году она была полностью реабилитирована).

Ленинская премия (1966). Государственная премия СССР (1953). Премии Л.И. Мандельштама (1947), М. В. Ломоносова (1962). Член ряда академий наук и научных обществ

Абрикосов Алексей Алексеевич — физик-теоретик, академик АН СССР с 1987года (член-корреспондент с 1964 года). Родился 25 июня 1928 года в Москве, в семье Фанни Давыдовны Вульф и Алексея Ивановича Абрикосова – профессора патологоанатомии, руководившего бальзамированием тела Ленина. В 1948 – 65 годах работал в Институте физических проблем АН СССР, с 1965 года — зав. отделом Института теоретической физики АН СССР, одновременно с 1966 года— профессор Московского университета, с 1976 года— зав. кафедрой Московского института стали и сплавов. С 1989 года живет в США (гражданин с 1999 года), работает в Argonne National Laboratory, преподавал в университетах Иллинойса и Юты.

Исследования посвящены сверхпроводимости, теории твердого тела и квантовой жидкости, астрофизике, статистической физике, физике плазмы, квантовой электродинамике. Рассчитал (1954 — 56) функции Грина и эффективные сечения различных процессов при больших энергиях в квантовой электродинамике. Выдвинул (1952) идею о существовании сверхпроводников II рода. Построил в 1957 году теорию магнитных свойств сверхпроводящих сплавов, введя представление о двух критических полях и «смешанном» состоянии с вихревой структурой токов — «вихри Абрикосова» (Ленинская премия, 1966). В 1960 году совместно с Л.П. Горьковым разработал теорию сверхпроводников с магнитными примесями и предсказал явление бесщелевой сверхпроводимости. Исследовал свойства сильно сжатого вещества, дал (1954) уравнение состояния водорода при сверхвысоких давлениях с переходом из молекулярной в атомарную

металлическую фазу. В 1962 — 73 годах создал теорию полуметаллов типа висмута, предсказал появление бесщелевого состояния и экситонных фаз в сильном магнитном поле. Построил теорию бесщелевых полупроводников (1970-74). Развил общий подход для изучения проводимости квазиодномерных систем и ввел понятие о параметре делокализации (1976-77). Создал теорию спиновых стекол с короткодействием (1978-80). Выдвинул (1978) идею о высокотемпературной сверхпроводимости кристаллической экситонной фазы с тяжелыми дырками — «металлического экситония».

Премия Ф. Лондона (1972), Государственная премия СССР (1982).
Нобелевская премия 2003.

Абрикосов женат, имеет двух сыновей и дочь, его жена — Светлана Бунькова, 1977 года рождения.

За жизнью в России, работами своих коллег Алексей Абрикосов старается следить. По его мнению, человек, занимающийся наукой, должен зарабатывать достаточно, чтобы чувствовать себя комфортно. Сам он, по его словам, зарабатывает сегодня хорошо, но должен думать о будущем. Абрикосов хорошо помнит, как 15 лет назад приехал в Америку без копейки в кармане. Было ему тогда 62 года - возраст, когда многие в Америке уже уходят на пенсию, предварительно накопив достаточно денег. Российскому же ученому, несмотря на громкие звания, которые были присвоены ему на родине, всё пришлось начинать с нуля. В этом плане денежное выражение полученной Нобелевской премии очень полезно. «Уйдя на пенсию, а точнее - в отставку, - поправляется Абрикосов, - я уже не буду нищим». Впрочем, уходит он не собирается, находится в хорошей форме и намерен продолжить научные занятия. Возвращаясь к теме утечки мозгов из России, отметим: в редких интервью ученый всегда откровенен и предельно недипломатичен. На вопрос Дмитрия Серкова («Итоги. RU», 14 октября 2003 года), что заставило Абрикосова уехать в 1991 году из России, Алексей Алексеевич ответил: «Дело в том, что я всегда читал газеты между строк и на тот момент реально осознал, что фундаментальная наука в России медленно умирает, уже через год-другой она может полностью лишиться финансирования. К тому же я понял: все идет к тому, что в стране может произойти государственный переворот. Перспектива остаться за железным занавесом на тот момент меня совсем не прельщала. Мне хватило с избытком тех 18 лет, в течение которых я как секретный физик оставался невыездным. Теперь с американским паспортом я путешествую по всему миру - и отдыхаю, и общаюсь с коллегами».

Журналист был настойчив и попытался выяснить мнение Нобелевского лауреата о развитии физики в России, на что Абрикосов удивился: «А разве она развивается? Все более или менее значимые физики работают ныне за пределами России в самых разных странах. Я никогда не был сторонником

термина «русская физика», но, тем не менее, многие выдающиеся работы подписаны русскими фамилиями». На вопрос Серкова, считает ли себя Абрикосов учеником Ландау, ученый ответил коротко: «Несомненно. Мой учитель - только он». Кстати, Кора Дробанцева-Ландау в своей книге «Академик Ландау. Как мы жили» вспоминает: «Как-то на очередной звонок открыла дверь я. Поднявшись к Дау, сказала: «Даунька, там к тебе пришел симпатичный мальчик-школьник». Этот школьник недолго просидел в библиотеке, а когда он ушел, сияющий Дау мне сказал: «Коруша, это не школьник, а студент первого курса, он на редкость талантлив, я из него сделаю настоящего теоретика». Это был Алеша Абрикосов».

Микроскопическая теория сверхпроводимости была создана в 1957 году Джоном Бардиным, Леоном Купером и Джоном Р. Шриффером и получила название БКШ – теории.

Леон Купер родился 28 февраля 1930 года в Нью-Йорке, в семье Ирвинга Купера и его жены Анны, до замужества Золя. Леон вырос в Нью-Йорке, посещал среднюю школу в Бронксе, а затем поступил в Колумбийский университет, где специализировался по физике. Он стал бакалавром в 1951 году, магистром в 1953 году и доктором в 1954 году. Во время обучения в Колумбийском университете основные интересы Купера лежали в области квантовой теории поля, которая описывает взаимодействие частиц и полей на атомном или субатомном уровне.

Стипендия Национального научного фонда позволила Куперу провести 1954-55 академический год в Институте фундаментальных исследований в Принстоне (штат Нью-Джерси), после чего он два года выполнял постдокторскую работу под руководством Джона Бардина в Иллинойском университете. Бардин изучал сверхпроводимость и другие свойства вещества при температурах, всего лишь на несколько градусов превышающих абсолютный ноль.

За короткое время Купер показал, что взаимодействие между электронами и кристаллической решеткой порождает связанные пары электронов. Во время движения сквозь кристалл металла один электрон притягивает окружающие положительно заряженные атомы, вызывая этим небольшую деформацию кристаллической решетки. Эта деформация в свою очередь создает кратковременную концентрацию положительного заряда, которая притягивает второй электрон. Таким путем два электрона оказываются связанными друг с другом посредством кристаллической решетки, образуя то, что известно как куперовская пара.

Основываясь на этом открытии, Дж. Роберт Шриффер, аспирант Иллинойского университета, который также работал под руководством Бардина, разработал метод анализа движений большого числа пар

взаимодействующих электронов. За месяц он, Бардин и Купер обобщили модель Шриффера, создав тем самым общую теорию сверхпроводимости. Названная БКШ-теорией (по инициалам трех ее создателей), она утверждает, что в сверхпроводящем материале большая доля свободных электронов ведет себя согласованным образом. В результирующем когерентном состоянии электроны движутся в унисон. Ниже критической температуры эффект образования электронных пар, обеспечивающий координированное движение электронов, оказывается сильнее тепловых колебаний атомов металла. Возмущение, которое отклонило бы отдельный электрон и, следовательно, вызвало бы появление электрического сопротивления, не может сделать это в сверхпроводнике, не воздействуя на все электроны, участвующие в сверхпроводящем состоянии. Это событие маловероятно, и поэтому парные электроны движутся когерентно без потери энергии. БКШ-теорию часто считают наиболее важным вкладом в теоретическую физику с момента создания квантовой теории.

Купер вместе с двумя своими коллегами получили в 1972 году Нобелевскую премию по физике «за создание теории сверхпроводимости, обычно называемой БКШ-теорией». В Нобелевской лекции Купера обсуждались микроскопические интерференционные квантовые эффекты в теории сверхпроводимости. Признавая практическое значение своей работы, он отметил, что «теория не производит сокровищ этого мира (хотя и может направлять нас к их достижению). Теория – нечто большее. Она является упорядочением опыта, придающим опыту смысл, а также доставляет нам удовольствие чистого созерцания».

С 1957 по 1958 год Купер работал ассистент-профессором в университете штата Огайо, а затем занимал различные профессорские должности в Браунском университете, совмещая с 1974 года эту работу с обязанностями содиректора Браунского неврологического центра. Много времени он отдавал развитию теории центральной нервной системы. Его особенно интересовало, как модификация нейронов ведет к организации распределенной памяти. Вместе со своим коллегой Чарлзом Элбаумом Купер разработал гибкую систему, способную распознавать рукописные буквы и преобразовывать их в печатные. Эта система была использована корпорацией IBM в 1987 году.

Купер и его жена Кэй Энн, до замужества Аллард, состоят в браке с 1969 года, у них две дочери.

Кроме Нобелевской премии, Купер был награжден премией Комстока Национальной академии наук США (1968) и медалью Декарта Университета Рене Декарта (1971). Он обладает почетными степенями Колумбийского университета, Суссекского университета. Иллинойского университета, Браунского университета и университета штата Огайо.

Он член Американской академии наук и искусств, Американского физического общества, Национальной академии наук, Американского философского общества и Федерации американских ученых.

Джон Роберт Шриффер родился 31 мая 1931 года в г. Оук-Парк (штат Иллинойс), в семье Джона Г. Шриффера и Луизы (урожденной Андерсон) Шриффер. В 1940 году семья переезжает в г. Манхассет (штат Нью-Йорк), а еще через девять лет в г. Юстис (штат Флорида). По окончании Юстисской средней школы в 1949 году. Шриффер поступает в Массачусетский технологический институт, намереваясь стать инженером-электриком. Через два года он избирает своей специальностью физику и в 1953 году получает степень бакалавра. В 1954 году он защищает в университете штата Иллинойс диссертацию, выполненную под руководством признанного авторитета в области физики твердого тела Джона Бардина, и получает степень магистра. Диссертация Шриффера была посвящена исследованию электронной проводимости на поверхности полупроводника. По завершении работы над диссертацией он присоединяется к Бардину в исследовании явления сверхпроводимости и свойств вещества при температурах, близких к абсолютному нулю.

В 1956 году один из постдокторантов Бардина в Иллинойском университете Леон Н. Купер доказал, что взаимодействие электронов проводимости с атомными колебаниями приводит к образованию связанных пар электронов. Один электрон, двигаясь сквозь кристалл металла, притягивает к себе окружающие положительно заряженные атомы. Эта легкая деформация кристаллической решетки создает мгновенную концентрацию положительного заряда, которая в свою очередь притягивает второй электрон. Таким образом, два электрона оказываются косвенно связанными через посредническое действие кристаллической решетки. О таких электронах говорят, что они образуют куперовскую пару.

Шриффер и Бардин попытались распространить куперовскую идею о воздействии пар электронов на поведение подавляющего большинства свободных электронов в сверхпроводящем твердом теле. Шриффер уже хотел было отказаться от дальнейших попыток найти решение проблемы, но Бардин, который как раз в то время должен был отправиться в Швецию на церемонию вручения ему Нобелевской премии по физике за 1956 год, присужденной ему за вклад в изобретение транзистора, уговорил Шриффера поразмыслить еще месяц над проблемой, и за этот месяц Шрифферу действительно удалось разработать статистический метод, который позволил получить решение проблемы.

По возвращении Бардина трое исследователей Бардин, Купер и Шриффер,

объединив усилия, показали, что взаимодействие между куперовскими парами охватывает многие свободные электроны в сверхпроводящем веществе, вынуждая их двигаться строго согласованно. Как и предполагал когда то Фриц Лондон, сверхпроводящие электроны образуют единое квантовое состояние, охватывающее весь материал. Ниже критической температуры сила спаривания, удерживающая электроны в их согласованном движении, по интенсивности превосходит тепловые колебания атомов в металле. Возмущение, способное отклонить отдельный электрон и поэтому порождающее электрическое сопротивление, не может этого сделать, не затрагивая при этом все электроны, участвующие в сверхпроводящем состоянии. Такое событие необычайно мало вероятно, и в результате сверхпроводящие электроны дрейфуют когерентно без потерь энергии. За вклад в теорию сверхпроводимости Шриффер в 1957 году был удостоен докторской степени в Иллинойском университете.

Теория Бардина – Купера – Шриффера (БКШ) была признана одним из наиболее важных достижений теоретической физики со времени создания квантовой теории. В 1958 году, применяя теорию БКШ, Купер и его коллеги предсказали, что очень холодный жидкий гелий-3 (изотоп гелия, ядро которого состоит из двух протонов и одного нейтрона) должен обладать сверхтекучестью, т.е. переходить в необычное состояние материи, характеризующееся отсутствием вязкости и поверхностного натяжения. Ранее сверхтекучесть наблюдалась в более широко распространенном изотопе гелий-4 (ядро которого состоит из двух протонов и двух нейтронов), но, по общему мнению, была невозможна в изотопах с нечетным числом нуклонов. Сверхтекучесть гелия-3 была экспериментально подтверждена в 1962 году.

В 1972 году Ш.рифферу, Куперу и Бардину была присуждена Нобелевская премия по физике «за созданную их совместными усилиями теорию сверхпроводимости, обычно называемую теорией БКШ». Выступая при презентации лауреатов, Стиг Лундквист, член Шведской королевской академии наук, сказал: «В своей фундаментальной работе вы предложили полное объяснение явления сверхпроводимости. Ваша теория позволила также предсказать новые эффекты и стимулировала интенсивные теоретические и экспериментальные исследования. Последующие работы в области сверхпроводимости поразительным образом подтвердили широчайший диапазон применимости и справедливость основных понятий и идей, изложенных в вашей фундаментальной статье 1957 года».

Теория БКШ оказала глубокое влияние и на физическую теорию, и на технику. Именно она привела к созданию сверхпроводников, способных работать при высоких температурах или при наличии сильных магнитных полей. Такие сверхпроводники имеют решающее значение для создания электромагнитов, позволяющих получать мощные магнитные поля, но

потребляющих мало энергии. Такого рода магниты находят применение при исследовании термоядерного синтеза; в магнитной гидродинамике; генерировании электрического тока при прохождении сильно ионизованного газа через магнитное поле; при ускорении до высоких энергий частиц в физике элементарных частиц; в магнитной подвеске при движении без трения; в биологических и физических исследованиях, связанных с взаимодействием атомов и электронов с сильным магнитным полем; при создании компактных мощных электрических генераторов. Открытие физиком из Уэльса Брайаном Д. Джозефсоном особых режимов на границах между двумя сверхпроводниками (эффект Джозефсона) привело к созданию сенсоров, способных детектировать магнитную активность внутри живых организмов и обнаруживать залежи руды и нефти на основе их магнитных свойств.

В 1957-58 годах на правах постдокторанта Национального научного фонда Шриффер занимался исследованием сверхпроводимости в Бирмингемском университете (Англия) и в Институте Нильса Бора в Копенгагене (Дания). Там же в 1960 году он встретил Анне Грете Томсен. Через несколько месяцев они поженились. У них две дочери и сын.

Шриффер преподавал физику в Чикагском университете (1957-60), университете штата Иллинойс (1959-60), Пенсильванском университете (1962), Корнеллском университете (1969-75) и с 1975 года – в Калифорнийском университете в Санта-Барбаре. Он занимается также исследованием магнитных свойств материалов, свойств сплавов и поверхностных эффектов. В Пенсильванском университете Шриффер стал одним из соавторов доклада, на основе которого была создана программа афро-американских исследований. Он не дает себя в обиду, у него по каждому поводу имеется наготове саркастическая реплика.

Шриффер удостоен многочисленных наград в том числе премии Комстока американской Национальной академии наук (1968), премии Оливера Бакли по физике твердого тела Американского физического общества (1968) и медали Джона Эрикссона Американского общества шведских инженеров (1976). Он почетный доктор пяти университетов, член американской Национальной академии наук, Американской академии наук и искусств, Американского философского общества и Датской королевской академии наук и искусств.

Явление сверхпроводимости можно было бы объяснить довольно легко, если бы не предельно малые изменения энергии -10^{-8} эВ в процессе перехода между нормальной и сверхпроводящей фазами совершенно различными по характеру. Тогда как энергия, характерная для фотопроводимости или кулоновская энергия электронов проводимости имеет порядок 1эВ. Предельная резкость фазового перехода указывает на то, что

взаимодействие должно связывать очень большое число электронов, но, как было только что сказано, таким образом, чтобы энергия основного состояния менялась на очень малую величину. Подобными свойствами, как показал Д. Бардин, обладает электрон - фононное взаимодействие. Электрон, движущийся через кристаллическую решетку вызывает в ней возмущения, а решетка, в свою очередь, действует на электрон в результате появления кристаллических сил. Колебательное движение решетки квантуется по средством фононов и электрон в решетке окутывается облаком виртуальных фононов. Данный механизм взаимодействия был предложен Д. Бардиным и независимо рассмотрен Х. Фрелихом еще в 1950 году. Однако, средняя энергия электрона, обусловленная таким взаимодействием, оказалась на 3-4 порядка больше, чем нужно для объяснения сверхпроводимости. Только через семь лет Д. Бардин, Л. Купер и Д. Шриффер показали, что основным взаимодействием пар электронов посредством обмена виртуальными фононами. Механизм образования пар был разработан Л. Купером. Электроны с противоположными спинами и импульсами вследствие притяжения к ионам кристаллической решетки, которое можно интерпретировать через обмен фононами, образуют связанное состояние (пару Купера).

Бозе – Эйнштейна конденсат таких пар образует основное состояние сверхпроводника, отделенное от первого возбужденного состояния, как показал Дж. Р. Шриффер, энергетической щелью $\Delta \sim 3,5kT_c$. Таким образом, при температурах меньше критической тепловое возбуждение недостаточно для переброса электронов в возбужденное состояние и разрыва пары. Теория БКШ естественным образом объяснила изотопический эффект, открытый в 1950 году, и, что очень важно, позволила выразить критическую температуру T_c через фононные и электронные характеристики. В результате этого появилась возможность вести осмысленный поиск новых сверхпроводников с более высокой T_c из числа материалов с большими значениями дебаевской температуры и константы электрон-фононного взаимодействия. Для гипотетического металлического водорода была предсказана огромная $T_c = (200 - 300)$ К. Но теперь "подкачал" уже эксперимент. Максимум, чего удалось добиться за 30 лет со времени публикации БКШ - это повысить T_c до 24 К в Nb_3Ge (1973 год).

Одновременно теория сверхпроводимости продолжала развиваться и в другом направлении. В 1964 году Литтл и Гинзбург независимо высказали идею о возможном нефононном механизме сверхпроводимости в низкоразмерных (квазиодномерных или квазидвумерных) системах. Было показано, что замена фононов на экситоны (возбуждения подсистемы связанных электронов) в принципе позволяет повысить T_c до (50 - 500) К. Однако поиск таких сверхпроводников не увенчался успехом.

За разработку теории сверхпроводимости ее авторам Дж. Бардину, Л. Куперу и Дж. Шрифферу была присуждена Нобелевская премия 1972 года.

Большой вклад в создание теории сверхпроводимости внесен также Н.Н. Боголюбовым, который показал, что сверхпроводимость представляет собой сверхтекучесть электронной ферми – жидкости и на этой основе вместе с Д.В. Ширковым и В.В. Толмачевым разработал в некоем смысле альтернативный БКШ вариант теории сверхпроводимости. Однако из-за задержки в публикации результатов (Н.Н. Боголюбов с сотрудниками решили представить их в виде монографии, а не отдельных статей), Нобелевским комитетом приоритет был отдан американским исследователям.

Развитие теории сверхпроводимости стимулировало поиски других возможных ее механизмов. В этом плане особое внимание уделяется нитевидным (одномерным) и слоистым (двумерным) структурам, обладающим достаточно большой проводимостью, в которых можно ожидать более интенсивного притяжения между электронами, чем в обычных сверхпроводниках. В случае сверхпроводимости, возникающей в результате фононного обмена, существует верхний предел критической температуры $T_c \leq 0,135T_D$, где T_D - температура Дебая, ограничивающая верхний предел колебаний кристаллической решетки (частоты фононов). Поскольку, для большинства металлов $T_D < 300K$ критическая температура, по-видимому, не может превышать для металлических сверхпроводников $40K$. В неметаллических средах и, прежде всего, в керамиках притяжение между электронами может возникнуть за счет обмена экситонами и для образования куперовских пар необходима комбинация двух подсистем - одной с металлической проводимостью, а другой с диэлектрической, с соответствующим экситонным спектром. Хотя идеи использования керамики для повышения критической температуры были известны с шестидесятых годов и исследования в этом направлении велись достаточно интенсивно, в буквальном смысле эффект разорвавшейся бомбы в научном мире произвело сообщение сотрудников исследовательской лаборатории ИВМ в Швейцарии Алекса Мюллера и Георга Беднорца в марте 1987 года о наблюдавшейся ими переходе в сверхпроводящее состояние $LaBaCuO$ - керамики при температуре $35K$. В дальнейшем не имело никакого значения, что при этой температуре наблюдался лишь эффект Мейснера, а обращение в нуль сопротивления происходило только при $T_c = 11K$ и керамика оказалась не самой перспективной, к тому же единственный сверхпроводящий образец вскоре рассыпался. К исследованиям подключились более ста исследовательских лабораторий разных стран, США и Япония сменяли друг друга в гонке за все более высокие значения критической температуры, которые изменялись, если не ежедневно, то еженедельно. Так что никто особенно не был удивлен, когда в конце года ранее никому не известные первооткрыватели высокотемпературной сверхпроводимости А. Мюллер и Г. Беднорц стали Нобелевскими лауреатами. Тем более, что работали они в лаборатории фирмы ИВМ, которой получено больше Нобелевских премий, чем иной промышленно развитой страной.

Беднорц Йоханнес Георг (Bednorz), немецкий физик. Родился 16 мая 1950 года в г. Ноинкирхен, Германия. В 1976 году окончил Университет г. Мюнстер, а в 1982 году Швейцарский Федеральный Технологический Институт (г. Цюрих). В 1982 году Беднорц поступил на работу в Цюрихскую исследовательскую лабораторию IBM (с 1987года - профессор Цюрихской исследовательской лаборатории)

Труды по высокотемпературной проводимости. В 1986 году с А. Мюллером открыли новый класс металлооксидных высокотемпературных сверхпроводников (LaBaCuO), работающих при послеазотных температурах. В 1987 году Георг Беднорц вместе с профессором Алексом Мюллером получил Нобелевскую премию за существенный прорыв в открытии сверхпроводимости керамических материалов. Владелец многих научных наград таких как: Премия Марсель-Бенуа 1986 года (Швейцарский Форд Марсель-Бенуа), Премия Дени Хенман 1987 г. (Академия наук Геттенген), Премия немецкого общества физики 1987 года, Премия Европейского Общества Физики 1988 года, Международная Премия американского Общества Физики, Премия в области физики Берлинского Университета 1987 года, Премия Итальянского Общества Керамических материалов 1991 года. Профессор Беднорц получил почетное звание Доктора естественных наук Университета Зальцбурга, а также университета Регенсбурга, он также является Почетным членом Академии Керамики, членом Американского Общества Физики.

Мюллер Карл Александр (Muller Karl Alexander) – швейцарский физик. Родился 20 апреля 1927 года в Базеле. В 1958 году окончил Швейцарский федеральный технологический институт. С 1963 года в Цюрихской исследовательской лаборатории IBM (инженер-исследователь, руководитель физического отдела). Работал в Цюрихском университете (профессор с 1987 года). Работы в области физики твердого тела, в частности керамических сплавов, физике низких температур, сверхпроводимости. С начала 80-х годов занимался поисками веществ, которые могли бы стать высокотемпературными сверхпроводниками. В 1983 году привлек для совместной работы Беднорца. В 1986 году они достигли сверхпроводимости в синтезированном ими соединении бария, лантана, меди и кислорода — т.н. металлоксидной керамике LaBaCuO (La_2CuO_4 с примесью Ba) при температуре 33 К, т.е. на 11 К выше, чем была достигнута до них. Их открытие немедленно вызвало волну экспериментов во всем мире и в течение года были достигнуты температуры перехода, приближающиеся к 100 К.

К началу 1988 года исследования высокотемпературной сверхпроводимости дали следующие результаты: наибольшая критическая температура по эффекту Мейснера составила 118K и наблюдалась для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ керамики, критическая температура по исчезновению сопротивления составила около 130K , а сам переход к идеальному проводнику был размазан по температуре на $12-20\text{K}$. Технология получения сверхпроводящих керамик в принципе проста. Смесь исходных веществ, тщательно измельченных и перемешанных в нужной пропорции, прокаливают в воздухе при 950°C в течение 12 часов, затем охлаждают и придают прессованием нужную форму будущему сверхпроводнику. Далее еще одна прокалка при температуре 950°C в течение шести часов в атмосфере чистого кислорода и медленное охлаждение. Приготовленная таким образом керамика почти наверняка покажет сверхпроводящие свойства, если только окисление прошло достаточно глубоко и содержание кислорода ($7-\delta$) в керамике не меньше 6,5.

Освоенная лабораториями и промышленностью технология зернистых образцов иттрий - бариевой керамики привела к их применению в ряде отраслей, но, в целом, это оказался не тот материал, который мог бы, по первым ожиданиям, совершить революцию в науке и технике, сравнимую с той, что совершили когда-то полупроводники.

Причин этому несколько. Первая и главная – невозпроизводимость критического тока. В зависимости от невыясненных нюансов технологии критический ток меняется от образца к образцу в пределах от единиц до тысяч ампер на квадратный сантиметр. Вторая причина – попытки заключить сверхпроводящую керамику в медную оболочку, как это делается для сверхпроводников из сплавов ниобия с титаном и оловом (медная оболочка позволяет подводить холод к сверхпроводнику и служит для перехвата тока при переходе его в нормальное состояние, при этом для толщины сверхпроводника в несколько десятков микрон в оболочке он остается весьма гибким) не дали положительных результатов – медь отбирала из керамики кислород и величина критического тока уменьшалась. Третья – нестабильны не только свойства, но и сама керамика, причем срок ее существования непредсказуем. Четвертая – нет полной теории сверхпроводящего состояния керамики и зависимости его от состава и других характеристик керамики. Механизм высокотемпературной сверхпроводимости до сих пор непонятен. Не исключено, что он является фононным. Обсуждаются также спиновый, экситонный и другие электронные механизмы. Ни одна из предложенных моделей не лишена недостатков и не позволяет объяснить всю совокупность экспериментальных фактов. По-видимому, при описании высокотемпературной сверхпроводимости нельзя ограничиваться каким-либо одним типом взаимодействия. Дело осложняется тем, что даже в нормальном состоянии высокотемпературные сверхпроводники обладают рядом необычных свойств. Некоторые авторы, к числу которых относится известный физик Ф.Андерсон, подвергают сомнению возможность

использования ферми-жидкостных представлений для описания высокотемпературной сверхпроводимости. «Будущее покажет, так ли это», - говорит В.Л.Гинзбург в своей знаменитой статье «Сверхпроводимость: позавчера, вчера, сегодня и завтра». Но если фононный механизм в ВТСП окажется все же определяющим, то величина T_c в классе медных оксидов вряд ли превысит 200К. Весьма примечательно, что В.Л.Гинзбург оставляет конец периода "сегодня" неопределенным. По-видимому, Виталию Лазаревичу хотелось бы, чтобы событием, которым закончится этот период, стало понимание механизма сверхпроводимости ВТСП.

А что же «завтра»? В этот период, будем надеяться, реализуется «голубая мечта» - комнатно-температурная сверхпроводимость с $T_c = (300 - 400)$ К. В соединениях, какого типа? Трудно сказать... Возможно, это будут слоистые квазидвумерные системы, а может быть - что-то такое, о чем мы сейчас и не подозреваем. Когда это произойдет - тоже неизвестно. По словам В.Л.Гинзбурга: «у нас имеется один естественный рубеж - 2011-й год, то есть столетие со дня открытия сверхпроводимости».

А послезавтра? В.Л.Гинзбург в своем обзоре не рассматривает этот временной период. Заглянуть бы в него хоть одним глазком... Будем ли жить в эту пору прекрасную...

Поэтому экспериментаторам в данной области приходится наподобие древних алхимиков руководствоваться интуитивными соображениями.

Независимо от успехов и неудач высокотемпературной сверхпроводимости, обычные сверхпроводники давно стали существенной частью науки и техники, органично описались в ее строение. Широко используются сверхпроводящие магниты для исследования магнитных, электрических и оптических свойств веществ, в экспериментах по изучению физики плазмы, атомных ядер и элементарных частиц, а также в технике связи и радиолокации, в качестве индукторов динамомашин. Принципиально новые возможности открывает сверхпроводимость в создании магнитных накопителей энергии с практически неограниченным временем ее хранения. Построены сверхпроводящие резонаторы, обладающие рекордно высокой (до 10^{10}) добротностью, сверхпроводящие элементы для ЭВМ.

Особое значение имеют также **туннельные эффекты в сверхпроводниках**. Туннельный эффект или преодоление частицей потенциального барьера, когда ее энергия меньше высоты барьера, в сверхпроводниках и особенно в контактах сверхпроводников с нормальным металлом или другим сверхпроводником представляет весьма своеобразное с физической точки зрения и практически значимое явление.

Если имеются два куска металла разделенных слоем изолятора толщиной $\sim 10^{-7}$ см (обычно окисной пленкой на одном из металлов), то, благодаря туннельному эффекту, электроны могут переходить из одного металла в другой и между металлами устанавливается равновесие. Если оба металла находятся в нормальном состоянии, то при приложении к ним

разности потенциалов и потечет ток $J = U/R$, где R - сопротивление контакта. Если же один из металлов находится в сверхпроводящем состоянии, то ток возникает лишь начиная с разности потенциалов $eU = \Delta$. В последнем случае равновесие электронов имеет своеобразный характер: куперовские пары со стороны сверхпроводника и два «свободных электрона» со стороны металла. В принципе даже малая разность потенциалов, приложенная к контакту, должна была бы вызывать ток куперовских пар, но двойной заряд пары уменьшает вероятность туннелирования, делая ее практически равной нулю. Таким образом, прежде чем перейти в нормальный металл куперовская пара должна разорваться. При обратном переходе электрона из нормального металла в сверхпроводник он не может перейти в основное состояние (ему не с чем связаться в пару), но только в возбужденное состояние с энергией Δ . Следовательно, при $T = 0$ и $eV < \Delta$ тока нет $J = 0$, а при $eV > \Delta$ ток изменяется

по закону $J = \sqrt{u^2 - \Delta^2/e^2} / R$. Отсюда по порогу для тока можно непосредственно определить ширину щели между основным и возбужденным состоянием. Исследования туннельного эффекта сверхпроводник – нормальный металла и сверхпроводник – сверхпроводник были проведены в 1960 г. Айвором Живером (норвежцем по происхождению, инженером по образованию, сотрудником исследовательской лаборатории «Дженерал электрик компании»). Данные исследования принесли ему Нобелевскую премию 1973 году.

Айвор Живер (Джайевер) родился 5 апреля 1929 года в Бергене и был вторым ребенком из трех детей фармацевта Джона А. Джайевера и урожденной Гудрун М. Скаруд. Он учился в начальной школе в Тотене и в средней в Хамаре. После окончания средней школы в 1946 году Живер в течение года работал на военном заводе Рауфосса, а в 1948 году поступил в Норвежский технологический институт в Тронхейме, который окончил в 1952 году с дипломом инженера-механика.

В том же году Живер был призван в армию, где служил в звании капрала в течение года. Демобилизовавшись, он работал экспертом в Норвежском патентном бюро. В 1954 году сложности с жильем в Норвегии побудили Живера отправиться в Канаду, где он в течение короткого времени работал помощником архитектора, а затем в качестве инженера-механика принял участие в осуществлении фундаментальной инженерной программы компании «Дженерал электрик». В 1956 году Живер перешел в научно-исследовательский центр компании «Дженерал электрик» в Скенектади (штат Нью-Йорк), где занимался решением проблем в области прикладной математики. Именно в Скенектади у Живера пробудился интерес к физике, и в 1956 году он был принят в группу, занимавшуюся исследованиями по физике твердого тела. Тогда же, без отрыва от

работы, он поступил в аспирантуру при Политехническом институте Ренсселаера.

В «Дженерал электрик» Живер исследовал электрическое поведение переходов, состоящих из металлических контактов, разделенных очень тонкими изолирующими слоями. Эта работа представляла коммерческий интерес, поскольку в большинстве электрических металлических контактов их поверхности разделены тонкими изолирующими слоями оксидов и загрязнений. С точки зрения классической физики следовало бы ожидать, что в тех случаях, когда напряжение между двумя контактами не слишком велико для того, чтобы электроны могли преодолеть электрический барьер, созданный изолятором, ток в цепи течь не будет, поскольку нет электронов с энергией, достаточной для проникновения сквозь изолятор. Квантовая механика, описывающая поведение систем в атомном или субатомном масштабе, предполагает, что если изолирующая пленка достаточно тонка, то электрон может «туннелировать» сквозь нее и оказаться по другую сторону барьера. Японский физик Лео Эсаки изобрел диод (так называемый туннельный диод, или диод Эсаки), в котором электрические переходы настолько тонки (толщина перехода составляет около одной миллиардной доли метра), что электроны могут туннелировать сквозь них, порождая необычные и полезные электрические свойства такого диода.

Не прекращая своих исследований, Живер в рамках аспирантской программы познакомился с теорией сверхпроводимости БКШ, согласно которой, взаимодействие электронов с атомными колебаниями в материале порождает так называемые запрещенные энергии электронов в сверхпроводнике, т.е. электронам в сверхпроводниках не разрешается иметь эти энергии.

Живер решил экспериментально определить влияет ли наличие запрещенных энергии в сверхпроводниках на электрические свойства перехода из изолятора между нормальным металлом и сверхпроводником? Он обнаружил, что запрещенные энергии легко наблюдаемы и могут быть измерены с помощью разработанной им методики. Это послужило убедительным подтверждением теории БКШ. Дальнейшие исследования напыленных пленок алюминия, разделенных только слоем оксида алюминия, показали, что электрические свойства таких переходов позволяют получить огромное количество информации о характеристиках атомных колебаний и поведении сверхпроводников. Тем самым они дают информацию, которую вряд ли можно было бы получить каким-то другим способом. Метод туннелирования Живера, быстро стал одним из самых основных способов наблюдения и определения свойств сверхпроводников.

В 1962 году Брайан Д. Джозефсон обобщил идеи Живера, относительно случая перехода из изолятора между двумя сверхпроводниками.

Джозефсон предположил, что между двумя сверхпроводниками токи могут течь даже в отсутствие напряжения между ними, а напряжение, приложенное к переходу, вызовет высокочастотный переменный ток (эффекты Джозефсона). Теория Джозефсона способствовала созданию необычайно чувствительных детекторов изменения магнитного поля и электрического напряжения. Устройства, основанные на использовании эффектов Джозефсона, находят применение при создании быстродействующих логических цепей с низким расходом энергии в компьютерах. В 1964 году Живер получил докторскую степень и гражданство Соединенных Штатов.

В 1973 году Живеру и Лео Эсаки была присуждена половина Нобелевской премии по физике «за экспериментальные открытия явлений туннелирования в полупроводниках и сверхпроводниках». Другая половина была отдана Джозефсону. В речи на церемонии вручения Нобелевской премии Стиг Лундквист из Шведской королевской академии наук заявил, что три новых лауреата «открыли в физике новые области исследования. Эти области тесно взаимосвязаны, поскольку пионерские работы Эсаки заложили основу и послужили непосредственным стимулом для открытия Живера., а работы самого Живера в свою очередь стали стимулом, который привел к теоретическим предсказаниям Джозефсона... Открытия лауреатов были быстро восприняты в электронике, нашли применение при детектировании гравитационных волн, геологической разведке рудных месторождений, передаче сообщений сквозь толщу воды и горные массивы, изучении электромагнитного поля вокруг сердца и головного мозга».

В ответной речи Живер сказал, что «дорога к научному открытию редко бывает прямой и не обязательно требует глубоких познаний и навыков. Я убежден, что неопыт часто имеет преимущество перед знатоком именно в силу своего невежества, так как в силу своего невежества даже не представляет всех сложных причин, по которым бессмысленно даже пытаться поставить данный эксперимент». Однако, добавил Живер, «очень важно иметь возможность вовремя получить совет и помощь от специалистов различных областей знания. Я оказался в нужном месте, в нужный момент времени и... обрел так много друзей, самоотверженно помогавших мне».

Получив стипендию Гуггенхайма, Живер провел 1970 год в Кембриджском университете, где изучал биофизику, а затем вернулся в компанию «Дженерал электрик». Темой его последующих исследований были свойства клеточных мембран и поведение белковых молекул на твердых поверхностях. Последняя работа Живера по иммунологии была выполнена в компании «Дженерал электрик» и в Медицинском центре Олбани.

В 1952 году Живер вступил в брак с Ингер Скрамстад, у них четверо

детей. Большой любитель игр и спортивных развлечений на открытом воздухе, Живер охотно играет в теннис, любит прогулки, путешествия, катание на лыжах, парусный спорт и виндсерфинг.

В 1965 году Живер был награжден премией Американского физического общества по физике твердого тела Оливера Э. Бакли. Он состоит членом Национальной академии наук США, Института инженеров электротехники и электроники, Норвежской академии наук и Биофизического общества, а также Американского физического общества.

Другой класс явлений, имеющих место при контакте двух сверхпроводников был предсказан в докторской диссертации 22-летнего Брайана Дейвида Джозефсона. После экспериментального подтверждения, данные эффекты получили его имя, а он сам был удостоен Нобелевской премии 1973 года.

Уэльский физик **Брайан Дэвид Джозефсон** родился 4 января 1940 года в Кардиффе в семье Абрахама и Мими Джозефсон. По окончании местной средней школы он поступил в Тринити-колледж Кембриджского университета, который окончил в 1960 году со степенью бакалавра. В том же колледже Джозефсон получил ученые степени магистра и доктора наук (1964). С 1962 по 1969 год он младший научный сотрудник Тринити-колледжа.

Впервые известность пришла к Джозефсону, когда он, еще в студенческие годы (1960), обратил внимание на то, что все исследователи, применявшие эффект Мессбауэра для измерения гравитационного красного смещения гамма-излучения, упустили из виду основную источник ошибок в своих экспериментах. Общая теория относительности Альберта Эйнштейна указывает на то, что движение фотонов в гравитационных полях сопровождается изменением их энергии. Экспериментаторы пытались измерить изменение длины волны гамма-излучения, распространяющегося снизу вверх и сверху вниз какой-либо башни. Джозефсон заметил, что различие между температурой источника и детектора гамма-излучения всего лишь на 1K приводит к сдвигу длин волн на величину, примерно равную той, которую экспериментаторы пытались измерить. Открытие Джозефсона заставило ученых повторить свои исследования при строгом контроле температуры наиболее ответственных частей измерительных приборов.

Около 1962 года Джозефсон приступил к изучению сверхпроводимости – явления, состоящего в том, что при охлаждении веществ до температуры ниже определенной критической их электрическое сопротивление падает до нуля. Сверхпроводимость возникает вследствие способности спаренных

электронов в проводнике взаимодействовать через атомные колебания (фононы), возбуждаемые в веществе. Незадолго до этого Айвар Джэйвер, работавший в компании «Дженерал электрик», обнаружил, что если электрический контакт состоит из сверхпроводящего материала и нормального металла с очень тонкой прослойкой изолятора, разделяющей два проводника, то его электрические свойства позволяют получить множество информации о свойствах сверхпроводника. В 1962 году Джозефсон теоретически рассчитал, как будет вести себя аналогичный контакт между двумя сверхпроводниками. Он обнаружил, что ток может течь через изолятор и при отсутствии разности потенциалов между двумя проводниками (стационарный эффект Джозефсона). Это был совершенно неожиданный, не согласующийся с классическими физическими моделями результат. Джозефсон также предположил, что если к контакту приложить разность потенциалов, то через него пойдет осциллирующий ток с частотой, зависящей только от величины приложенного напряжения (нестационарный эффект Джозефсона). Оба эффекта очень чувствительны к магнитному полю в области контакта. Эти явления были вскоре подтверждены экспериментально, и их свойства оказались в полном согласии с теорией Джозефсона. Более того, многие экспериментаторы, используя методику Джэйвера, и ранее наблюдали эффекты Джозефсона, но отбрасывали их как «шумы»

Открытие эффектов Джозефсона оказало существенное влияние на современную физику. Частота переменного тока зависит от приложенного к контакту напряжения и отношения заряда электрона к постоянной Макса Планка (основной физической константы, определяющей поведение систем, масштабы которых порядка атомных и меньше). Эффекты Джозефсона позволили резко увеличить точность, с которой известна величина отношения (e/h) . Они способствовали созданию принципиально нового квантового стандарта напряжения, используемого ныне во многих национальных бюро стандартов. Соединяя в замкнутую цепь два джозефсоновских контакта, экспериментаторы сконструировали необычайно чувствительные датчики магнитного поля. Такие устройства, называемые сквидами (от англ. SQUID сверхпроводящее квантовое интерференционное устройство), самые чувствительные из известных ныне детекторов магнитного поля. Они применяются для измерения магнитных полей живых организмов, составления магнитных карт и детектирования объектов, скрытых под поверхностью. На основе эффектов Джозефсона были изготовлены и чувствительные детекторы очень слабых изменений напряжения. Многообещающие перспективы сулит также использование узлов, в основу которых положены эффекты Джозефсона, в качестве элементов быстродействующих компьютерных цепей с очень низким потреблением энергии.

В 1969 году Джозефсон стал старшим научным сотрудником Кембриджского университета. В 1966-67 годах он побывал в качестве приглашенного профессора в университете штата Иллинойс. С 1967 по 1972 год Джозефсон был заместителем директора по научным исследованиям в Кембридже. С 1972 по 1974 год преподавателем, а с 1974 года – профессором физики Кембриджского университета.

Джозефсон был удостоен половины Нобелевской премии по физике 1973 года «за теоретические предсказания свойств тока, проходящего через туннельный барьер, в частности явлений, общеизвестных ныне под названием эффектов Джозефсона». Другую половину премии разделили Лео Эсаки и Айвор Живер. В последующие годы Джозефсон продолжал заниматься исследованием сверхпроводимости и критических явлений, возникающих в системах вблизи точек перехода, например критической точки воды (в которой исчезает различие между жидкой и газовой фазами), и аналогичных переходов между сверхпроводящим и нормальным состояниями в тех системах, в которых такие переходы возможны. В конце 60-х годов Джозефсон проявил интерес к проблемам разума и интеллекта. В начале 70-х годов он занимался трансцендентальной медитацией. Джозефсон надеялся, что ему удастся достичь синтеза современной физики и математики, с одной стороны, и теории интеллекта, развиваемой духовным лидером Махариши Махешем Йоги, – с другой. Джозефсон оставил свои исследования в русле основного потока физики, чтобы целиком посвятить себя трансцендентальной медитации и ментальной теории. Комментируя свое решение, он заявил: «Я избираю весьма нетрадиционный теоретический подход к явлениям интеллекта, поскольку убежден, что наиболее фундаментальные понятия, относящиеся к нему, были открыты еще в древности... В частности, в своих исследованиях я в значительной степени исхожу из формулировок, почерпнутых мной в многочисленных лекциях Махариши Махеша Йоги. Я надеюсь, что полезность и правильность развиваемых им представлений будут подтверждены с помощью компьютерного моделирования».

В 1976 году Джозефсон вступил в брак с Кэрол Энн Оливер. У них есть дочь. Свой досуг Джозефсон проводит, занимаясь горным туризмом, астрономией, конькобежным спортом и фотографией.

В числе прочих наград Джозефсон удостоен премии «За успехи в науке» Американской исследовательской корпорации (1969) и медали Хьюза Лондонского королевского общества (1972). Он член Лондонского королевского общества и иностранный член американского Института инженеров по электротехнике и электронике. Американской академии наук и искусств.

При протекании тока сверхпроводимости через тонкий слой

диэлектрика, обычно представляющий собой пленку окиси на поверхности металла толщиной 10^{-7} см (т.н. контакт Джозефсона), при условии, что величина тока не превышает некоторого предельного значения, называемого критическим током контакта, падение напряжения на контакте отсутствует. Данное явление называют стационарный эффект Джозефсона. Если через контакт пропускается ток больше критического, то на контакте возникает падение напряжения и контакт начинает излучать электромагнитные волны, что представляет собой нестационарный эффект Джозефсона. Излучать электромагнитные волны может только переменный ток и именно такой ток течет сквозь контакт Джозефсона при постоянном падении напряжения на контакте U . Частота излучения связана с падением напряжения соотношением $\omega = 2eU/\hbar$. Излучение обусловлено тем, объединенные в пары электроны сверхпроводимости проходя сквозь контакт приобретают некоторую дополнительную энергию по отношению к основному состоянию сверхпроводника равную $2eU$. Единственная возможность для куперовской пары электронов вернуться в основное состояние это излучить дополнительную энергию в виде электромагнитного кванта.

Эффект Джозефсона указывает на существование в сверхпроводниках электронной упорядоченности – фазовой когерентности, заключающейся в наличии у всех пар Купера одинаковой фазы φ их волновой функции $\psi = |\psi|e^{i\varphi}$. Контакту Джозефсона соответствует определенная разность фаз $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, где φ_1 и φ_2 - значения фазы волновой функции сверхпроводников, разделенных контактом. Согласно квантовой механике наличие разности фаз приводит к существованию тока через переход, плотность которого равна $j = j_0 \sin \Delta\varphi$. Экспериментальное обнаружение данного тока доказало существование в природе макроскопических явлений, непосредственно определяемых фазой волновой функции.

Аналогичный эффект наблюдается, когда сверхпроводники соединены тонкой перемычкой (мостиком или точечным контактом), а также если между ними находится тонкий слой металла в нормальном состоянии или полупроводника. Подобные системы вместе с контактами Джозефсона называют слабосвязанными сверхпроводниками. Подобные системы послужили основой для создания сверхпроводящих квантовых интерферометров (сквид), содержащих параллельно включенные слабые связи между сверхпроводниками.

Результирующий ток, текущий через эти слабые связи равен $J = J_1 \sin \Delta\varphi_1 + J_2 \sin \Delta\varphi_2$, где $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ разности фаз на первом и втором контактах Джозефсона. Тем самым, происходит своеобразная интерференция сверхпроводящих токов через слабые связи. Критический ток J_c зависит от электрических характеристик контактов и величины магнитного потока Φ

пронизывающего контур:

$$J_c = 2J_{ок} \left| \cos\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right) \right|, \text{ где } J_{ок} - \text{критический ток}$$

первого и второго контактов.

Период колебаний тока равен кванту магнитного потока Φ_0 , что позволяет использовать данное устройство для точного измерения слабых магнитных полей (до 10^{-18}Тл), малых токов (до 10^{-10}А) и напряжений (до 10^{-15}В).

Проявляющееся в эффекте Джозефсона квантование магнитного потока является фундаментальным свойством сверхпроводимости. Минимальное значение магнитного потока Φ_0 через кольцо из сверхпроводника с током

равно $\Phi_0 = \frac{2\pi\hbar}{2e} = 2,067 \cdot 10^{-15} \text{Вт}$. Существование кванта магнитного потока отражает квантовую природу явлений магнетизма.

На основе Джозефсоновских структур были созданы квантовые стандарты напряжения и формы сигналов. Комбинация эффекта Джозефсона с квантованием магнитного потока в замкнутых сверхпроводящих контурах открыла возможность создания устройств сверхбыстрой обработки информации с так называемой БОК – логикой (быстрой одноквантовой логикой), в которой информация представляется не потенциалом – наличием или отсутствием напряжения, а наличием или отсутствием импульса между тактовыми импульсами. Уровень диссипации информации составляет при этом 10^{-5} от полупроводниковых аналогов. Созданы также Джозефсоновские структуры с весьма малым размером контакта, позволяющие осуществлять транспорт через контакт одного или нескольких электронов, что привело к разработке нового типа электронных приборов – одноэлектронных.

Заключение

«Невозможно объять необъятное», поэтому за пределами данного пособия остались вопросы физики рентгеновского излучения и работы В.К.Рентгена (Нобелевская премия 1901 года за открытие лучей, названных его именем), М.Лауэ (нобелевская премия 1914 за открытие дифракции

рентгеновских лучей на кристаллах), Г.Брэгга, Л. Брэгга (Нобелевская премия 1915 года за изучение структуры кристаллов с помощью рентгеновских лучей), Ч.Баркла (Нобелевская премия 1917 года за открытие характеристических рентгеновских лучей), Г.Мозли (заложившего основы рентгеноспектрального анализа, погибшего в 1915 году на фронте), М.Сигбана (Нобелевская премия 1924 года за исследования и открытия в области рентгеновской спектроскопии), А.Комптона (Нобелевская премия 1927 года за открытие явления, названного его именем); вопросы физики высоких давлений и работы П.Бриджмена (Нобелевская премия 1946 года), Л.Ф.Верещагина (безвременно скончавшегося в 1977 году); вопросы физики магнетизма и электронной структуры магнитных неупорядоченных систем, исследовавшие Л. Неелем (Нобелевская премия 1970 года), Н. Моттом (Нобелевская премия 1977 года), Дж. Ван Флэком (Нобелевская премия 1977 года); а также работы по отдельным разделам физики твердого тела Ш. Гильома (Нобелевская премия 1920 года за открытие сплавов инвара и элинвара), О.Ричардсона (Нобелевская премия 1928 года за исследования термоэлектронной эмиссии), Г.А.Месяца (исследования взрывной электронной эмиссии), К.Дэвиссона, Дж.П.Томсона (Нобелевская премия 1937 года за открытие дифракции электронов на кристаллах), Ф.Блоха, Э. Парселла (Нобелевская премия 1952 года за открытие ядерного магнитного резонанса), Ф.Цернике (Нобелевская премия 1953 года за создание фазово-контрастного метода), Д.Габора (Нобелевская премия 1971 года за создание голографии), Ю.Н. Денисюка (голограммы его имени), К.Сигбана (Нобелевская премия 1981 года за вклад в развитие электронной спектроскопии), К.Вилсона (Нобелевская премия 1982 года за создание теории критических явлений), П.Ж. де Жена (Нобелевская премия 1991 года за описание молекулярного упорядочения в сложных конденсированных системах) и некоторые другие.

Отметим лишь две любопытные работы. Интересный пример открытия, «которое могло быть сделано гораздо раньше, но его почему-то проглядели» дает история эффекта Мёссбауэра. Весной 1953 года Рудольф Мёссбауэр (*немецкий физик, родился 31.01.1929 года в Мюнхене*) заканчивал Технический университет в Мюнхене и подыскивал себе тему дипломной работы. Обойдя нескольких профессоров, он дошел до профессора Х. Майер-Лейбница, у которого невзятой оказалась только одна тема под номером тринадцать «Ядерная резонансная флюоресценция». Мёссбауэру она понравилась только тем, что он не имел о ней ни малейшего представления, и решил, что если и не вытянет диплом, то узнает немало нового.

Для наблюдения резонансной флюоресценции γ -излучения свободных ядер необходимо компенсировать потери энергии γ -квантов на отдачу. Это можно сделать, используя эффект Доплера. Однако скорости, необходимые для компенсации отдачи, весьма велики $\approx 10^5$ см/с, и могут быть достигнуты

с помощью ультра центрифуг, либо в нагретом до весьма высоких температур газовом источнике. Эксперименты такого рода весьма сложны и трудоемки. Рудольф Мёссбауэр теоретически и экспериментально показал, что, если излучающие ядра входят в состав кристаллической решетки, то при определенных условиях существует конечная вероятность испускания γ -квантов без потери энергии на отдачу (эффект Мёссбауэра):

$$F(T) = \exp \left[-3E^2 (1 + 4 (T/\theta)^2 D(T)) / 8 M c^2 k\theta \right],$$

где θ – температура Дебая, $D(T)$ - функция Дебая, при высоких температурах $\approx \pi^2 / 6$. Тем самым вероятность резонансного поглощения убывает с ростом температуры, начиная с максимального значения при $T=0$ К. Типичные значения $F(T=0)$ равны 0,05 для γ -излучения Ir^{191} с $E=129$ КэВ и 0,95 для γ -излучения Fe^{57} с $E=14,4$ КэВ. Таким образом, эффект Мёссбауэра лучше всего проявляется для ядер с низкой энергией γ -излучения, высокой температурой Дебая и требует глубокого охлаждения. Первоначально Рудольф Мёссбауэр был вынужден использовать источник излучения Ir^{191} . Во всей Западной Германии тогда не было ни одного ядерного реактора и Мёссбауэру приходилось привозить радиоактивные источники из-за границы. При этом военная администрация не очень благожелательно относилась к таким поездкам и провозимому багажу. Эффект на Ir^{191} был невелик - меньше 0,02. Но когда Мёссбауэру удалось достать Fe^{57} , резонансное поглощение не только резко возросло, но и стало наблюдаться при комнатных температурах. Если первые результаты Мёссбауэра на иридиевом источнике вызвали скепсис и недоверие, то после публикации результатов с Fe^{57} в научной среде возник настоящий ажиотаж. Появились всевозможные приложения эффекта: проверка принципа эквивалентности и гравитационного смещения длины волны излучения в поле Земли, измерение магнитных и электрических полей вблизи ядер, а также квадрупольного электрического момента ядра, исследование влияния механических деформаций на строение кристаллической решетки и другие. Все эти приложения обусловлены возможностью измерения энергии с колоссальной относительной точностью (до 15-17 порядков). В 1961 году Рудольфу Мёссбауэру была присуждена Нобелевская премия «за открытие эффекта его имени».

В 1960 году Мёссбауэр должен был стать полным профессором Мюнхенского технического университета, но, разочаровавшись в бюрократических и авторитарных принципах организационных структур германских университетов, взял в 1960 году творческий отпуск в Гейдельберге и стал стипендиатом-исследователем в Калифорнийском технологическом институте, а в следующем году стал там профессором. Однако в 1964 году он вернулся в Германию, где занял пост профессора физического факультета Мюнхенского технического университета, преобразовав его по образцу организационных структур американских университетов. Некоторые ученые в шутку называли это изменение в

структуре германского академического образования «вторым эффектом Мёссбауэра». С 1972 по 1977 год Мёссбауэр возглавлял Институт Лауэ – Ланжевена в Гренобле (Франция). Член ряда академий наук и научных обществ, в частности иностранный член АН СССР с 1982 года. Премия В.Рентгена (1961), медаль Э.Грессона (1961) и другие награды. В 1957 году Мёссбауэр женился на Элизабет Притц, специалистке по дизайну, у них – сын и две дочери. На досуге Мёссбауэр играет на пианино, катается на велосипеде и занимается фотографией.

Известный американский физик Г.Липкин иллюстрирует историю открытия эффекта Мёссбауэра следующим образом:

Период	Дата	Примечание
Доисторический	До 1958	Могли бы открыть, но не открыли
Ранний иридиевый век	1958	Открыли, но не заметили
Средний иридиевый век	1958-59	Заметили, но не поверили
Поздний иридиевый век	1959	Поверили, но... не заинтересовались
Железный век	1960	у- у – у !!! Нобелевская премия

Приведем также статью «К квантовой теории абсолютного нуля температуры», опубликованную в весьма авторитетном физическом журнале «Naturwissenschaften», **19**, №2 (1931). Авторами статьи являются известные физики Д.Бак (*профессор Бразильского физического института*), Г.Бете (*профессор Корнельского университета, впоследствии руководитель теоретического отдела в Лос-Аламосе, лауреат Нобелевской премии (1967), премии Энрико Ферми (1961), медали Макса Планка (1955)*), В.Рицлер (*директор Института ядерной физики Боннского университета*).

«В данной работе нами рассмотрен кристалл с гексагональной решеткой. Как известно, при абсолютном нуле температуры в системе происходит

вымораживание всех степеней свободы, то есть прекращаются полностью все внутренние колебания. Однако для электронов в атоме это не имеет места. Каждый такой электрон, согласно Эддингтону, обладает $1/\alpha$ степенями свободы, где α -постоянная тонкой структуры. Поскольку рассматриваемый нами кристалл состоит также из протонов, которые по теории Дирака можно рассматривать как дырки в электронном газе, то к $1/\alpha$ степеням свободы электрона следует добавить столько же степеней протона. Таким образом, чтобы достичь абсолютного нуля температуры, мы должны отнять у нашей электрически нейтральной системы (кристалла) $-(2/\alpha - 1)$ степеней свободы (в расчете на один нейтрон). Единицу мы вычли, чтобы не учитывать вращательного движения. Следовательно, для температуры абсолютного нуля находим $T_0 = -(2/\alpha - 1)$. Подставляя сюда $T_0 = -273$, получаем $\alpha = 1/137$. Это значение в пределах ошибки эксперимента находится в замечательном согласии с ранее известными значениями. Легко показать, что этот результат не зависит от выбора структуры кристаллической решетки».

Редакторы журнала «попались на удочку громких имен» и, не вникнув в существо написанного, направили материал в набор, не разглядев в нем шутки. (В отечественной литературе статья публиковалась в сборниках «Физики шутят» М.: Мир, 1966, и «Физики продолжают шутить» М.: Мир, 1968). На наш взгляд данная работа вполне заслуживает того, чтобы войти в историю физики твердого тела.

Литература:

1. Абрикосов А.А. Основы теории металлов: Учебное руководство. — Москва: Наука, 1987. — 520 с.

2. Алферов Ж.И., Казаринов Р.Ф.. Авторское свидетельство N 181737, заявка N 950840 с приоритетом от 30 марта 1963 г.; Н.Кромер. Proc. IEEE, v.51, 1782 (1963).
3. Алферов Ж.И.. ФТП, т.1, 436 (1967). Ж.И.Алферов. ФТП, т.32, 3 (1998)
4. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Гарбузов Д.З., Жилиев Ю.В., Морозов Е.П., Портной Е.Л., Трофим В.Г.. ФТП, т.4, 1826 (1970).
5. Андроникашвили Э.Л.. Воспоминания о гелии – II/ Библиотека журнала «Химия и жизнь». Т. 1. с.122-183. М.: Наука, 1989.
6. Биккин Х.М., Кузнецов А.В.. Квантовый эффект Холла. МИФ №2 /1998-99, с.132
7. Быков В.П.. Дробный заряд – новая тенденция в электронике. УФН. Т.176, №9, с.1009-1012, (2006)
8. Гинзбург В.Л.. О науке, о себе, о других. М. Наука, 1989 - с. 449
9. Дробанцева-Ландау К.А.. Академик Ландау. Как мы жили.- М.: «Захаров-АСТ», 1999.
10. Н.К.Душутин, Ю.В.Ясюкевич. Дробный квантовый эффект Холла. Вестник ИГУ, 2007, с.146-148
11. Иванов И.А. Гигантское магнетосопротивление <http://www//grani.ru/Science.go.html>
12. Ильин В.А.. История физики. – М.: Высшая школа, 2001. – с. 272
13. Капица П. Л., Эксперимент, теория, практика, М., Наука, 1981 - с.496
14. Капица П.Л., Абрикосов А.А., Халатников И.М. Квантовые жидкости. Теория. Эксперимент, М., 1969 – с.33
15. Качмарек Ф. Введение в физику лазеров. –М.: Мир, 1981. - с. 640
16. Клитцинг К. фон. Квантованный эффект Холла. УФН, Т.150,№1, с.107(1986)
17. Корнелл Э.А., Виман К.Э.. Бозе-Эйнштейновская конденсация в разреженном газе. УФН Т.173, № 12, с.1320-1338 (2003)
18. Кудейт Ф. Вакуумное туннелирование: новая методика в микроскопии / Физика за рубежом. Сер. А. Москва: Мир (1988), 93–111
19. Ландау Л.Д. Собрание трудов. - М.: Наука,. 1969.- 2 т.

20. Лафлин Р.Б.. Дробное квантование. УФН, т.170, №3, с.292-303, (2000)
21. В.С.Малышевский. Ядерная физика ФТТ. [www//phys.rsu.ru/web/nuclear](http://www.phys.rsu.ru/web/nuclear)
22. Машкевич В.С. Кинетическая теория лазеров. М.: –Мир, 1976. – с. 486.
23. Мендельсон К., На пути к абсолютному нулю, пер. с англ., М., 1971 – с.224
24. Мёссбауэр Р.. Открытие можно было сделать гораздо раньше, но его почему - то проглядели. Библиотека журнала «Химия и жизнь». Т. 1. с.102-107. М.: Наука, 1989.
- 25.С. А. Никитин. Гигантское магнетосопротивление // Соросовский образовательный журнал. 2004. № 2, с. 92–98.
26. Онищенко Е.А. Полупроводниковые гетероструктуры: от классических к низкоразмерным, или "конструктор" от Нобелевского лауреата. <http://www.ioffe.rssi.ru/journals/ftp.html.ru>
27. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. Техносфера. М: 2006. – с. 336
28. Стенхольм С. Основы лазерной спектроскопии. –М.: Мир, 1987.- с. 312
29. Суслов А. А., Чижик С. А. Сканирующие зондовые микроскопы (обзор) // Материалы, Технологии, Инструменты – Т.2 (1997), №3, С. 78–89
30. Спасский Б.И.. История физики. – 2 изд.- М.: Высшая школа, 1977.-2 ч.
31. Федотов Я. А., Основы физики полупроводниковых приборов, [2 изд.], М., 1970; Кремниевые планарные транзисторы, под ред. Я. А. Федотова, М., 1973; 3 и С. М., Физика полупроводниковых приборов, пер. с англ., М., 1973. www.sovencyclopedia.ru/?aid=78253
32. Халатников И. М., Теория сверхтекучести, М., 1971 – с. 195-201
33. Халл Дж.Л. Определение и измерение оптических частот. УФН. Т.176.№ 12, с.1353-1368. (2006)
34. Храмов Ю.А.. Физики. М.: Наука, 1983 — 400 с.
35. Хэнш Т.В.. Страсть к точности. УФН. Т.176 № 12, с.1368-1381 (2006)
36. Штермер Х. Дробный квантовый эффект Холла. УФН,т.170,№3,с.304(2000)
37. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange // Phys. Rev. B (1989). V. 39. P. 4828–4830.

38. Esaki L., Tsu. R. IBM J. Res. Dev., v.14, 61 (1970).
39. Fert A. et al. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices // Phys. Rev. Lett. (1988). V. 61. P. 2472–2475.
40. Myung Y.S.. W-coherent state and edge states in quantum Hall effect. arXiv: hep-th/9602133v1
41. Tsui D.C., Stormer H.L., Gossard A.C. *Phys. Rev. Lett.* **48** 1559 (1982) - pp.1559-1562
42. William E., Kelier, Helium-3 and Helium-4, N.-Y., 1969 - pp.436

Интернет-ресурсы:

43. [www//http.delfi.ru](http://delfi.ru)
44. [www//http.n-t.ru](http://n-t.ru)
45. [www//http.element.ru](http://element.ru)
46. <http://n-t.ru/nl/fz>
47. http://nuclphys.sinp.msu.ru/histan/nobelprice_n.htm
48. <http://www.eduspb.com/bio-full-list>