

Министерство образования Российской Федерации
Иркутский государственный университет

**Изучение температурной
зависимости сопротивления
металлов и полупроводников**

Методические указания

Иркутск 2003

Печатается по решению
научно-методического совета
Иркутского государственного университета

Дана краткая классическая теория металлов и полупроводников. Описана установка и методика измерения сопротивления при увеличении температуры.

Предназначена для студентов 1 и 2 курсов
естественных факультетов

Библиогр. 1 назв. Ил. 4

Составитель: к.ф.-м.н., доц. Л.И.Алексеева

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Л.А.Щербаченко

Изучение температурной зависимости сопротивления металлов и полупроводников

Цель работы:

1. Исследовать опытным путем зависимость изменения сопротивления металлов и полупроводников с увеличением температуры.
2. Построить графики этих зависимостей и определить их параметры: температурный коэффициент для металлов и энергию активации носителей тока для полупроводников.

Приборы и принадлежности:

Два термостата с образцами металла и полупроводника, мешалка, термометр, плитка, измерительный прибор В7-16.

Краткая теория:

Металлы. Носителями тока в металлах являются свободные электроны, существование которых с точки зрения классических представлений можно объяснить следующим образом.

При образовании кристаллической решетки металла в результате сближения изолированных атомов валентные электроны, сравнительно слабо связанные с атомными ядрами, отрываются от атомов металла, становятся свободными и могут

перемещаться по всему объему образца. Валентные электроны свободны в металлах даже при низкой температуре.

Таким образом, в узлах кристаллической решетки располагаются положительные ионы металла одно- или двухвалентные, а между ними хаотически движутся свободные электроны, образуя своеобразный «электронный газ», обладающий согласно классической электронной теории металлов Друде-Лоренца свойствами идеального газа. Общее число свободных электронов соответствует числу ионов в одном моле – число Авогадро или в единице объема – число Лошмидта N_L , которое примерно равно $10^{28} \div 10^{29} \text{ м}^{-3}$. По этой теории электроны обладают такой же энергией теплового движения, как и молекулы одноатомного газа. При своем движении электроны взаимодействуют с ионами решетки, в результате чего устанавливается тепловое равновесие между электронным газом и решеткой. Поэтому, применяя выводы молекулярно-кинетической теории, можно найти среднюю скорость теплового движения электронов $\langle v \rangle = \sqrt{8kT/\pi m_0} \approx 10^5 \text{ м/с}$, здесь K – постоянная Больцмана, $T = 300 \text{ К}$, m_0 – масса электрона.

Тепловое движение является хаотическим, т.е. все направления движения электронов равновероятны, направленное смещение зарядов отсутствует, электрического тока нет.

При наложении внешнего электрического поля на металлический проводник, кроме теплового движения электронов возникает их упорядоченное движение, т.е. возникает электрический ток. Среднюю скорость $\langle v \rangle$

упорядоченного движения электронов можно оценить по формуле плотности тока $j = ne \langle v \rangle$.

Выбрав допустимую плотность тока, например, для медных проводов $j = 10^7 \text{ А/м}^2$, получим, что при концентрации носителей тока $n = N_L = 8 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ средняя скорость упорядоченного движения электронов $\langle v \rangle = 7,8 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$.

Следовательно, даже при очень больших плотностях тока средняя скорость упорядоченного направленного движения электронов, обуславливающая электрический ток, значительно меньше их скорости теплового движения (восемь порядков).

Казалось бы, полученный результат противоречит известному факту, что скорость распространения электрического тока по цепи огромна и равна скорости света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. Это противоречие лишь кажущееся, так как скорость C является скоростью распространения электромагнитного поля вдоль проводов.

Участвуя в проводимости, электроны, ускоренные внешним электрическим полем, взаимодействуют с ионами решетки и в конце свободного пробега отдают им энергию, накопленную в электрическом поле. Их скорость уменьшается до нуля, а затем электрон вновь ускоряется внешним полем. В этом и состоит физический смысл сопротивления металлов.

Кристаллическая решетка, получая энергию электронов при протекании электрического тока, нагревается, т.е. увеличивается ее внутренняя энергия в соответствии с законом

Джоуля-Ленца $Q = I^2 R t$, здесь t - время протекания тока,

$R = \rho \frac{l}{S}$ - сопротивление проводника.

Опыт показывает, что в первом приближении изменение с увеличением температуры удельного сопротивления ρ , а следовательно, и общего сопротивления R , описывается линейной зависимостью

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (1)$$

где R_0 - при $0^\circ C$, R - при некоторой температуре t ; α - температурный коэффициент сопротивления, для чистых металлов при не очень низких температурах близок к $1/273 \text{ град}^{-1}$, т.е. можно записать $R = R_0 \alpha T$, где $T = t + 273$.

Итак, сопротивление металлов с увеличением температуры должно возрастать по линейному закону, что обусловлено, согласно классическим представлениям, увеличением интенсивности колебаний ионов решетки (рис. 2).

Полупроводники. По величине электрического сопротивления полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Удельное сопротивление полупроводников имеет порядок $10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Характерной особенностью полупроводников является то, что их электрические свойства резко меняются под влиянием ряда физических факторов: температуры, освещения, электрического поля, примесей. К полупроводникам относятся окислы и сульфиды металлов, а также интерметаллические соединения. Наиболее широко распространенными полупроводниковыми

элементами являются кремний и германий, имеющие решетку типа алмаза, в которой каждый атом связан ковалентными связями с четырьмя ближайшими соседями. Упрощенная плоская схема расположения атомов в кристалле Ge дана на рис.1, где каждая черточка обозначает связь, осуществляемую одним электроном. В идеальном кристалле такая структура представляет собой диэлектрик, так как все валентные электроны участвуют в образовании связей и, следовательно, не участвуют в проводимости.

При повышении температуры (или под действием других внешних факторов) тепловые колебания решетки могут привести к разрыву некоторых валентных связей, в результате чего часть электронов отщепляется и они становятся свободными. В покинутом электронном месте возникает дырка, заполнить которую могут электроны из соседней пары. (Дырка на чертеже изображена белым кружком, процесс перемещения дырки изображен в верхней центральной части рис. 1). В результате дырка, так же как и освободившийся электрон, будет двигаться по кристаллу. Движение электронов и дырок в отсутствие электрического поля является хаотическим. Если же на кристалл наложить электрическое поле, то электроны начнут двигаться против поля, дырки - по полю, что приведет к возникновению собственной проводимости германия, обусловленной как электронами, так и дырками. Причем число электронов и дырок одинаковое.

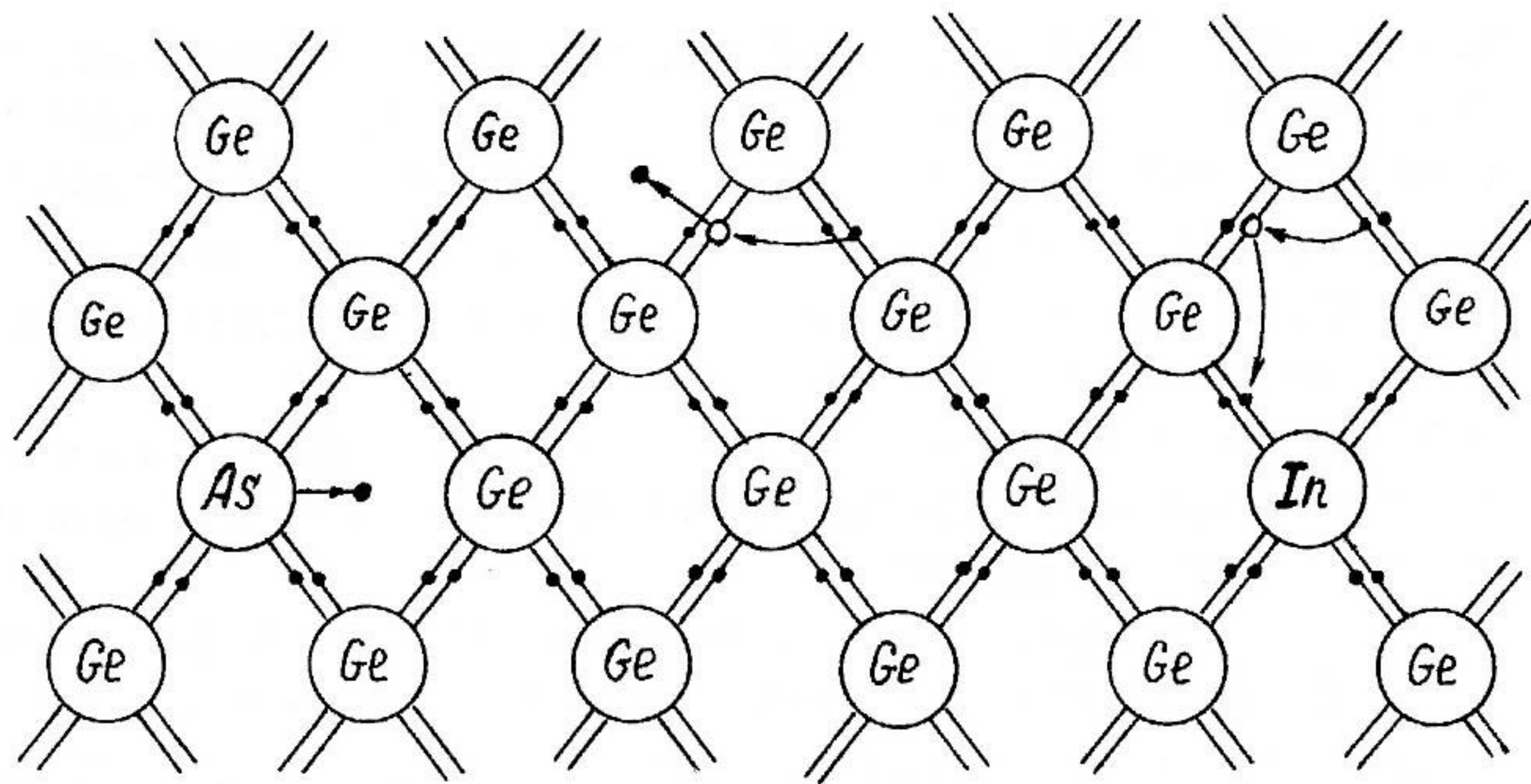


Рис.1

Для получения избыточной электронной или дырочной проводимости используют примеси. Для этого в чистые полупроводники вводятся атомы с большей валентностью, например, пентавалентный мышьяк (левая часть рис. 1). Один электрон не может образовать ковалентной связи, он оказывается лишним и может быть легко отщеплен от атома при тепловых колебаниях решетки, т.е. стать свободным. В этом случае образование свободного электрона не сопровождается нарушением ковалентной связи, дырка не возникает, преобладает электронная примесная проводимость n -типа.

При введении атомов меньшей валентности, например, трехвалентного индия (правая часть рис.1) одна из связей остается неупакованной и четвертый электрон может быть захвачен от соседнего атома основного вещества. Там образуется дырка. Дырки не остаются локализованными, они

перемещаются в решетке кристалла как свободные положительные заряды (проводимость p -типа).

Как отмечалось выше сопротивление металлов с повышением температуры растет по линейному закону (1) (рис.2), а проводимость уменьшается. (Проводимость и сопротивление – величины обратные).

Увеличение проводимости полупроводников с повышением температуры за счет увеличения числа свободных носителей заряда электронов и дырок – является их характерной особенностью. При этом сопротивление полупроводников уменьшается по экспоненциальному закону (рис. 3) и в определенных температурных интервалах описывается выражением (2)

$$R = R_0 e^{\frac{E}{kT}} = R_0 \exp(E/kT), \quad (2)$$

здесь e - основание натуральных логарифмов, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, E - энергия активации (высота потенциального барьера). Под энергией активации понимается энергия, которую нужно затратить, чтобы перевести электрон из связанного состояния в свободное. Представив зависимость сопротивления от температуры в логарифмическом масштабе (рис.4) можно определить E - энергию активации электронов, как тангенс угла наклона прямой к оси обратных температур.

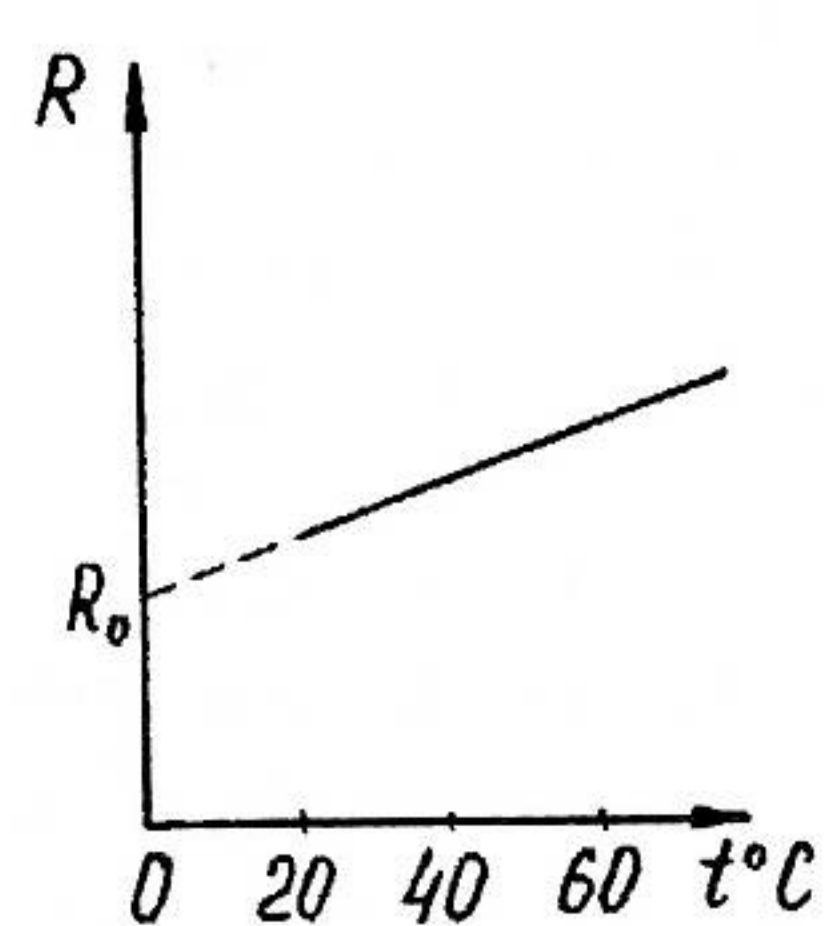


Рис.2

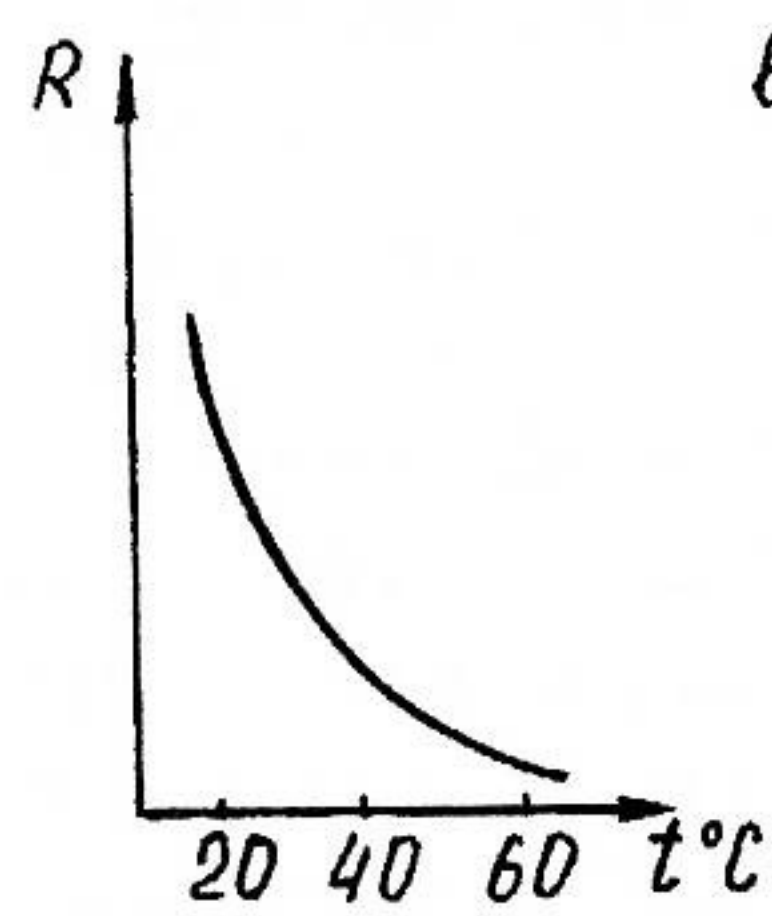


Рис.3

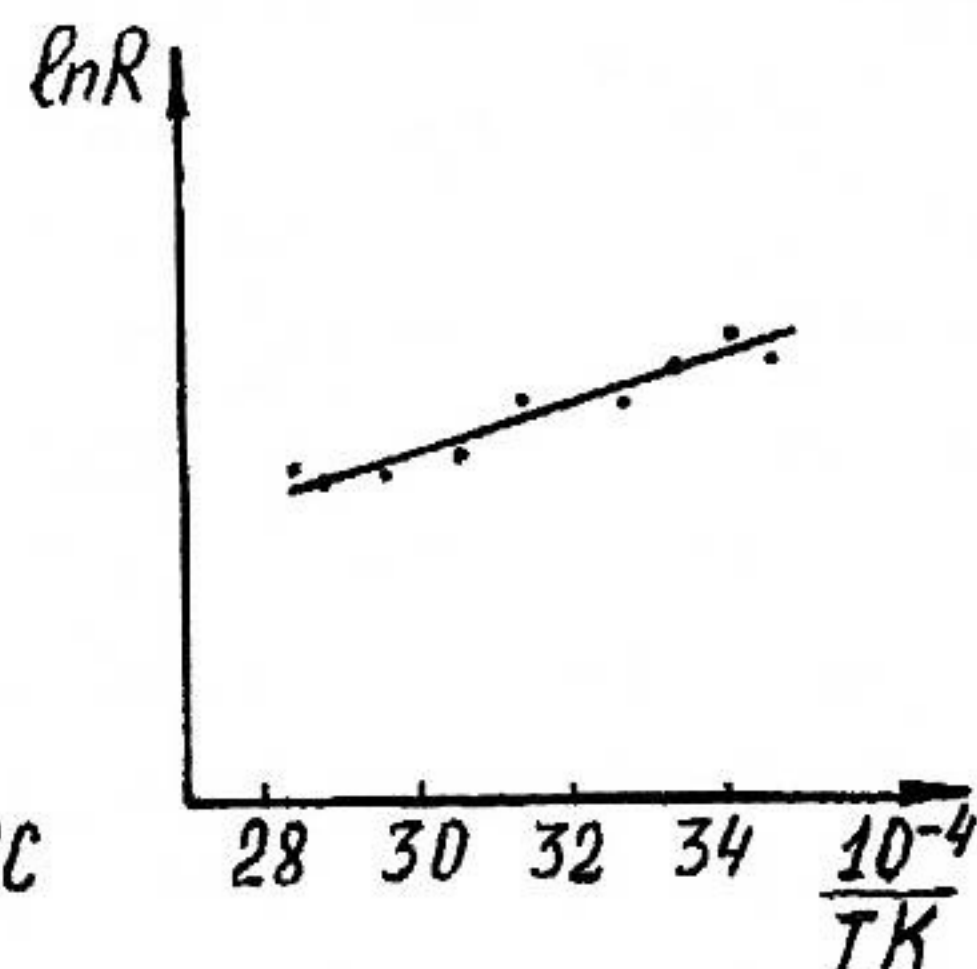


Рис.4

Описание установки

Термостат представляет собой два металлических стакана, вставленных один в другой. Внутренний заполнен трансформаторным маслом и помещен во второй стакан большего размера, наполненный водой. Исследуемый образец укреплен на крышке термостата и помещается в масло - непроводящую жидкость.

Термостат устанавливается на плитку, температура измеряется термометром, который вводится в термостат через отверстие в крышке. Для равномерного прогрева жидкость перемешивается мешалкой.

В крышке сделаны выводы от исследуемого образца. Они подсоединяются к измерительному прибору В7-16, который

представляет собой универсальный цифровой вольтметр. С помощью этого прибора можно измерять постоянное и переменное напряжение, а также сопротивление, т.е. прибор В7-16 может работать как омметр. Для этого переключатель рода работ следует установить в положение «R». При этом через образец будет протекать ток, а падение напряжения на нем (в соответствии с законом Ома $U = IR$) измеряется вольтметром, шкала которого проградуирована в Омах.

Порядок выполнения работы

1. Штеккер соединительного шнура подсоединяется к входному гнезду универсального вольтметра В7-16. Прибор подключить к сети 220 В. Включить тумблер «сеть», при этом должен загореться световой индикатор. Прибор прогревается 10-15 минут.
2. Переключатель рода работ поставить ризкой в положение «R». Убедитесь, что при разомкнутых концах соединительного шнура сопротивление бесконечно большое и на световом табло высвечивается П-перегрузка. Если концы замкнуть между собой, то сопротивление равно нулю и на индикаторе должны высвечиваться нули.
3. Концы соединительного шнура подключить к измерительному сопротивлению, погруженному в масло. **Будьте осторожны!** На световом табло высвечивается величина сопротивления образца: около 500 Ом - для полупроводника или около 50 Ом - для металла. Целесообразно вначале исследовать температурную

- зависимость сопротивления полупроводника, так как уменьшение его величины довольно значительное в 3-4 раза.
- Измерьте сопротивление полупроводникового образца при комнатной температуре. Показания прибора и термометра запишите в таблицу.
 - Установите термостат на плитку, включенную в сеть 220 В. Периодически помешивайте мешалкой для равномерности прогрева масла и образца.
 - Измерение сопротивления проводите через каждые 5°C до температуры $70-75^{\circ}$ - температура кипения масла. Термостат снимите с плитки. **Будьте внимательны!** Показания приборов запишите в таблицу.
 - Проведите аналогичные измерения п.п. 4-6 для металлического образца.
 - По завершению измерений тумблер «сеть» цифрового вольтметра следует выключить, прибор отключить от сети. Плитку отключить от сети.

Обработка результатов измерений

Задание I.

- Построить график изменения сопротивления металла с температурой (см. рис.2).
- Продолжив прямую до пересечения с ординатой, определить R_0 при $t = 0^{\circ}\text{C}$.

- Из уравнения (1) получить формулу для вычисления температурного коэффициента α и вычислить его для некоторого значения R и t .

Задание II.

- Построить график изменения сопротивления полупроводника с температурой $R = f(t)$ (см. рис.3).
- Для вычисления энергии активации необходимо убедиться, что полученная кривая - экспонента. Для этого прологарифмируем формулу (2), получим уравнение прямой

$$\ln R = \ln R_0 + E/kT \quad (3)$$

- По экспериментальным данным построить зависимость $\ln R = f(1/T)$ (см. рис.4), здесь $T = t + 273$. Если получится линейная зависимость, то эксперимент выполнен правильно. Прямую следует проводить между точек - метод усреднения.
- Получить формулу для вычисления E . Для этого запишите уравнение (3) для двух значений сопротивления и температуры. Вычитая второе равенство из первого получите формулу для вычисления E энергии активации.

$$E = K \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (4)$$

5. Вычислите значение активации исследуемого полупроводника. Для этого нужно взять на графике две экспериментальные точки, которые лучше всего лежат на прямой и отстоят друг от друга достаточно далеко, и подставить их значения в формулу (4). Величину E оценить в Дж и эВ.

Контрольные вопросы

1. Объясните механизм проводимости в металлах.
2. В чем состоит физический смысл сопротивления с точки зрения классической электронной металлов? Как и почему изменяется сопротивление металлов с температурой?
3. Расскажите о собственной и примесной проводимости полупроводников.
4. Как и почему изменяется сопротивление полупроводников с температурой?

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики: Учебное пособие для вузов. – М.: Высш.шк. 2002. – 542 с.