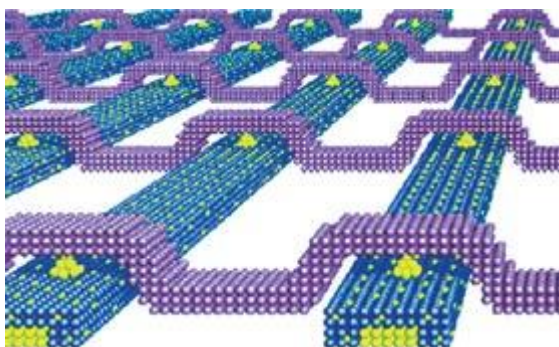


ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ
ГОУ ВПО ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Л.А. Скоробогатова, С.М. Зубрицкий, А.Л. Петров, А.Л. Семенов

ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ



Учебное пособие

ИРКУТСК 2009

УДК 539.213.2

Печатается по решению редакционно - издательского
совета Иркутского государственного университета

Рецензенты:

Л.А. Скоробогатова, С.М.Зубрицкий, А.Л. Петров, А.Л. Семенов.

Технологии материалов для микро- и наноэлектроники.

В учебном пособии последовательно описана технология производства интегральных схем. Приведены процессы обработки, нанесения, удаления и модификации вещества. Описаны особенности проведения операций, сборки и монтажа кристаллов, присоединения электродных выводов и герметизации.

Предназначено для студентов 4-х и 5-х курсов специальности «твёрдотельная электроника и микроэлектроника», «радиофизика и радиоэлектроника».а также магистрантов и аспирантов.

Библиогр. 6 назв. Ил. 15.

© Скоробогатова Л.А., Зубрицкий С.М., Петров А.Л., Семенов А.Л., 2009.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Контрольные вопросы	12
1. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ЧИСТОТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА	12
Контрольные вопросы	15
2.СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЦЕССАМ МАКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ	15
Контрольные вопросы	17
3. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ОСАЖДЕНИЯ ВЕЩЕСТВА	18
3.1. ОСАЖДЕНИЕ ВЕЩЕСТВА ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ	18
3.1.1.Газофазная эпитаксия	18
3.1.2. Получение поликристаллического кремния	23
3.1.3. Получение оксида и нитрида кремния	24
3.1.4. Пиролитическое осаждение	25
3.1.5. Газофазная эпитаксия тонких слоёв металлов	27
Контрольные вопросы	28
3.2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ЖИДКОЙ ФАЗЫ	28
3.2.1. Жидкофазная эпитаксия	28
3.2.2. Метод движущегося растворителя	29
Контрольные вопросы	31
3.3. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ВЕЩЕСТВА В ВАКУУМЕ ИЗ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ	31
3.3.1. Вакуум-термическое и электронно-лучевое испарение	31
3.3.2. Молекулярно-лучевая эпитаксия	36
Контрольные вопросы	38
3.4.ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ОСАЖДЕНИЯ	38
3.4.1. Катодное распыление	38
3.4.2. Ионно – плазменное распыление	41
3.4.3. Получение гидрогенизированного аморфного кремния	43
3.4.4. Плазмохимическое осаждение	44
Контрольные вопросы	46
4. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ УДАЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВА	46
4.2.ШЛИФОВАНИЕ И 4.1. СКРАЙБИРОВАНИЕ	46
ПОЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИН	47
4.3. ПРОЦЕССЫ ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ	48
4.3.1. Химическое травление	48

4.3.2. Электрохимическое травление.....	50
4.3.3. Сухое травление.....	50
4.3.4. Фотостимулированное травление.....	52
Контрольные вопросы.....	52
5. МЕТОДЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВЕЩЕСТВА.....	53
5.1. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ОКИСЛЕНИЯ.....	53
5.1.1. Термическое окисление.....	53
5.1.2. Окисление при высоком давлении.....	57
5.1.3. Окисление при пиролитическом разложении тетраэтоксисилана (ТЭОС).....	57
5.1.4. Плазменное анодное окисление.....	58
5.1.5. Качество окисных слоёв.....	59
Контрольные вопросы.....	60
5.2. ДИФФУЗИЯ.....	60
5.3. ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ.....	66
Контрольные вопросы.....	70
6. ЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.....	70
6.1. ФОТОЛИТОГРАФИЯ.....	71
6.1.2. Фотошаблон.....	76
6.2. ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ.....	76
6.3. РЕНТГЕНОВСКАЯ ЛИТОГРАФИЯ.....	79
6.4. ИОННО-ЛУЧЕВЫЕ СИСТЕМЫ ЛИТОГРАФИИ.....	80
6.5. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ЛИТОГРАФИЯ.....	81
Контрольные вопросы.....	82
7. СБОРКА И ГЕРМЕТИЗАЦИЯ.....	82
7.1. СБОРКА МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ.....	82
7.2. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА.....	85
7.3. ПАЙКА ВЫВОДОВ.....	86
7.4. ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНЫХ ВЫВОДОВ.....	87
7.5. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИС.....	88
Контрольные вопросы.....	93
8. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ И ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МИКРО- И НАНО-ТЕХНОЛОГИИ.....	93
8.1. ИНТЕГРАЦИЯ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ.....	95
8.2. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ.....	96
Контрольные вопросы.....	98
ЛИТЕРАТУРА.....	98

ВВЕДЕНИЕ

Технология материалов тесно связана с такой наукой, как материаловедение, которая изучает взаимосвязь между составом, структурой, строением и свойствами материалов.

Материаловедение является основой технологии электронных приборов, т.к. в процессе развития технологии материалов стирается грань между изготовлением материала и переработки его в прибор (например, производство эпитаксиальных плёнок различных полупроводниковых материалов).

Технология материалов электронной техники родилась одновременно с появлением первых электронных приборов. Развитие технологии материалов электронной техники отражает развитие электронного приборостроения. Сначала технология материалов электронной техники включала операции получения высокочистых поликристаллических полупроводников и выращивания легированных монокристаллов, которые были конечной продукцией полупроводникового производства. Подготовительные операции, предшествующие созданию приборов – резка монокристаллов на пластины, шлифовка, полировка, производилась на предприятиях, изготавливающих прибор. При этом переработке отходов полупроводниковых материалов (кроме Si), которые всегда возникают на этих операциях, уделяли недостаточное внимание. Однако, по мере роста объёмов производства полупроводниковых приборов и количества перерабатываемых монокристаллов, потерями отходов пренебрегать стало невозможно, тем более, что в них содержались ценные компоненты редких элементов (Ga, In и др.) в качестве легирующей добавки. Поэтому изготовление пластин и подложек стали осуществлять на предприятиях, производящих монокристаллы. На этом этапе

полупроводниковой технологии конечной продукцией стала шлифовка и полировка, пластинка-подложка.

В начале 60-х годов прошлого столетия полупроводниковое приборостроение, особенно микроэлектронное, стало использовать методы газо- и жидко-фазной эпитаксии, которая по физико-химическим основам ближе к технологии полупроводникового приборостроения. На этом этапе развития технологии полупроводниковых материалов наряду с монокристаллами и подложками конечной продукцией полупроводникового производства стали эпитаксиальные структуры. В зависимости от электрических свойств эпитаксиальных слоев такое изделие можно считать как полупроводниковым материалом, так и полупроводниковым прибором. Критерием для определения изделия служит характер выходных параметров, которые используются для контроля качества структуры. Если они материаловедческие (химический состав, концентрация легирующей примеси, структурное совершенство, электрические, оптические и другие физические свойства), то эпитаксиальная структура представляет собой материал. Если же в комплекс выходных параметров входят приборные характеристики (параметры электролюминесценции, пробивное напряжение, ВАХ и др.), то такая эпитаксиальная структура представляет собой приборную заготовку.

Развитие электроники происходит по пути миниатюризации.

Первым скачком в развитии электронной техники явился переход от вакуумных электронных ламп к транзистору.

Второй скачок связан с применением интегральных микросхем. Переход к интегральным микросхемам стал возможен после понимания того, что все элементы электронной схемы можно изготовить не из разных, а из одного полупроводникового материала. Таким материалом стал кремний. ИС состоит из огромного числа элементов, как для логических операций, так и для хранения информации, размещаемых на одной пластинке “чипе” *Si*. Это м.б. микропроцессор или память компьютера. Основные требования к кристаллам полупроводникового материала - сокращение числа дефектов и повышение

однородности при одновременном увеличении размеров кристалла. Эти требования связаны с тенденцией к увеличению числа элементов, размещаемых на одном “чипе”, что побуждает уменьшать характерные размеры электронного прибора до субмикронных величин и увеличивать размеры чипа до сантиметров. Успех этих попыток (например, создание памяти в 1 Мбит на одном чипе, зависит от выхода годных приборов на одну подложку и на всю партию (около 100 подложек)). При существующем качестве кристаллов (т.е. плотности дефектов) увеличение степени интеграции в конечном счёте приведёт к экономически невыгодному выходу годных приборов. Поэтому требование к сырью и технологическому процессу должен быть ужесточён. Для исходного сырья это означает уменьшение допустимых отклонений электронных свойств в микро и макро масштабах, как в поперечном сечении отдельной подложки, так и в продольном направлении кристалла от подложки к подложке. Поэтому основная задача технологии материалов – улучшение микро- и макро неоднородности. Электронные и оптоэлектронные свойства полупроводниковых кристаллов определяются концентрацией примесей, (легирующих и остаточных) и дефектами структуры кристалла. Так что требование улучшения оптоэлектронных свойств эквивалентно требованию более однородного распределения примесей и дефектов.

Следующий этап в развитии технологии – разработка устройств функциональной электроники. В функциональных микросхемах объединяются магнитные, оптические, термоэлектрические и другие объёмные и поверхностные эффекты. В функциональных микросхемах невозможно выделить отдельные элементы (транзисторы, диоды, конденсаторы, катушки индуктивности и др.)

Если на кристаллической подложке есть микро- и макро неоднородности, как в поперечном, так и в продольном направлении, то при последующем наращивании тонкого кристаллического слоя (эпитаксии), неоднородности подложки могут воспроизводиться и в слое, выращенном по эпитаксиальной

технологии. Для изготовления гетеро структур важно согласование параметров кристаллических решёток контактирующих материалов.

Прорыв в создании тонкослойных гетеро структур произошёл с появлением практичной технологии роста тонких слоёв методами молекулярно-лучевой эпитаксии, газовой эпитаксии из металлоорганических соединений и жидкофазной эпитаксии. Появилась возможность выращивать гетеро структуры с очень тонкой границей раздела. Это значит, что две гетеро структуры можно расположить так близко друг к другу, что в этом промежутке определяющую роль играют квантовые эффекты – квантовые ямы или квантовые стенки. В таких структурах большие деформации могут не приводить к появлению дислокаций, а значит и к необходимости в согласовании решёток

Перспективным направлением развития методов технологии материалов электронной техники является получение компактных nano кристаллических веществ, интенсивное изучение которых началось с 1985г. Сущность nano-технологий состоит в возможности работать на атомном и молекулярном уровне, в масштабах длин (1-100) нм. Первые средства для nano технологий были изобретены в Цюрихе и Рюмликоне в швейцарских лабораториях фирмы IBM. Сканирующий (растровый) туннельный микроскоп и атомно-силовой микроскоп и очень похожий на них сканирующий проектор электронно-лучевой литографии стали первым реальным воплощением фейнмановской машины для манипуляций на атомном уровне. Создатели растрового микроскопа Г. Биннинг и Х. Рюер в 1986 г. получили Нобелевскую премию. В 1982-1985 г. немецкий профессор Г. Глайтер реализовал способ получения компактных материалов с зёрнами nano метрового размера.

Таким образом, дальнейшая миниатюризация электроники непосредственно связана с nano технологиями. Первоначально слово “nano технологии” означало комплекс процессов, обеспечивающих высокоточную обработку поверхности с использованием сверхтонкого травления, нанесение плёнок, высокоэнергетических электронных, фотонных и ионных пучков. В настоящее время термин ”nanотехнологии” используется в широком смысле,

охватывая и объединяя технологические процессы и системы машин и механизмов, способные выполнять сверхточные операции в масштабе нескольких нано метров.

Уменьшение размеров на несколько порядков практически меняет физические основы работы наноэлементов. В наноэлементе используется уже не электроны как частицы, переносящие электрический заряд, а их волновые функции.

Процессы дрейфа и диффузии, характерные для микроэлектронных устройств, отсутствуют вовсе в наноэлектронных элементах. В основе наноэлементов лежат нулевые связи, сформированные потенциальные барьеры. Вход и выход элемента сформирован не в пространстве, а во времени. Как правило, наноэлектронный элемент состоит из набора квантовых ям и потенциальных барьеров. Энергетический спектр таких элементов зависит от размеров, а добавление лишь одного электрона существенно меняет энергетическую диаграмму.

Плотность активных элементов в устройствах наноэлектроники может достигать 10^9 - 10^{10} элементов/см². Наноэлементы дают возможность получать излучатели и приёмники в диапазоне частот 10^9 - 10^{13} Гц.

Технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и ИС обычно разделяют на три группы:

- нанесение вещества в виде слоёв или плёнок на поверхности подложек,
- удаление вещества с поверхности подложек,
- перераспределение атомов (ионов) примесей между внешней средой и поверхностью или объёмом подложек.

При процессах первых двух групп изменяется только геометрия подложек, а в третьей - состав, свойства и структура их внутренних областей (модификация) без существенного изменения геометрических размеров.

Важнейшим этапом производства полупроводниковых приборов и ИС является разработка технологического маршрута изготовления изделий. Технологический маршрут – это последовательность выполнения

технологических операций обработки полупроводниковых подложек при изготовлении полупроводниковых приборов или ИС данного типа. Каждый технологический процесс, входящий в маршрут, снабжается технологической документацией, содержащей подробное описание и отражающей методы, средства и порядок проведения отдельных операций и технологического процесса в целом.

По конструктивно-технологическим признакам полупроводниковые приборы подразделяют на приборы с *p-n* переходами (диоды, транзисторы, тиристоры, преобразователи лучистой энергии) и приборы без *p-n* перехода - это устройства, принцип действия которых основан на использовании объёмных свойств полупроводникового материала.

Интегральные микросхемы – это микроэлектронные изделия, выполняющие функции преобразования и обработки сигналов и имеющие высокую плотность упаковки электрически соединённых элементов, компонентов, кристаллов или их сочетаний. Интегральная микросхема представляет собой единое целое. Иногда интегральные микросхемы называют интегральными схемами или просто микросхемами.

Составной частью ИС являются элементы, которые выполняют роль электрорадиоэлементов (транзисторов, резисторов и др.) и не могут быть выделены как самостоятельные изделия. При этом активными называют элементы ИС, выполняющие функции усиления или другого преобразования сигнала (диоды, транзисторы), а пассивными – элементы, реализующие линейную передаточную функцию (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности).

В отличие от элементов компоненты ИС являются самостоятельными изделиями. Части полупроводниковых пластин (заготовок из полупроводниковых материалов), в объёме и на поверхности которых сформированы элементы ИС, а также соединения между ними и контактные площадки, называют кристаллами, Каждая ИС надёжно защищена от внешних воздействий прочным и герметичным корпусом или покрытием.

В настоящее время наибольшее распространение получили два метода создания ИС. При первом методе локальным воздействием (диффузией, ионным легированием) микроучасткам полупроводниковой пластины придают свойства, которыми обладают соответствующие электрорадиоэлементы (транзисторы, диоды). Соединением микроучастков между собой в соответствии с заданной электрической схемой получают полупроводниковые ИС.

При втором методе послойным нанесением плёнок различных материалов (испарением, распылением) на твёрдом основании формируют микроэлементы, межэлементные соединения и микросхемы в целом. ИС, все элементы и межэлементные соединения которых выполнены в виде плёнок, называют плёночными.

Комбинированием этих методов, которые не являются конкурирующими, а дополняют друг друга, на диэлектрических основаниях получают ИС, состоящие из плёночных пассивных элементов и активных элементов или кристаллов. ИС, выполненные на диэлектрическом основании и содержащие кроме элементов компоненты и кристаллы, называют гибридными.

Комбинированием полупроводниковой и плёночной технологии получают также совмещённые ИС. ИС, в объёме полупроводникового основания которых формируют все активные и некоторые пассивные элементы, а остальные пассивные элементы создают на поверхности, называют совмещёнными.

Применение ИС в различной радиоэлектронной аппаратуре привело к созданию микросборок (МСБ). Микроэлектронные изделия, предназначенные для выполнения определённых функций и состоящие из элементов, компонентов, корпусных бескорпусных ИС, называют микросборками. МСБ повышают степень миниатюризации электронной аппаратуры.

Изделия микроэлектроники подразделяют на следующие группы:

ИС (в том числе СВЧ ИС), БИС и МСБ, функциональные приборы, не имеющие аналогов электрорадиоэлементов, микрокомпоненты,

предназначенные для монтажа и сборки микросистемных изделий первых двух групп в блоки и устройства. К ним относятся многослойные печатные платы, гибкие кабели, электрические соединители, микропереключатели, кнопки, индикаторы и др.

Контрольные вопросы

1. Какова история развития технологии материалов электронной техники.
2. Что изучает материаловедение.
3. Назовите этапы развития электроники.
4. В чём состоит сущность нанотехнологий.
5. Что представляет собой ИС.
6. Какие существуют методы создания ИС.
7. Что называется микросборкой.
8. Назовите основные технологические процессы создания ИС.

1. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ЧИСТОТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Технологический микроклимат и чистота технологических сред является залогом высокого качества материалов для микро - и нано-электроники. Исходные материалы, среды, оборудование, технологическая тара, транспортные средств и другие промышленные сооружения являются потенциальными источниками загрязнений, вносимых в обрабатываемые изделия на всех этапах технологического процесса.

Между функциональными параметрами ИС и качеством отдельных компонентов технологических сред существует взаимосвязь. Невозможно гарантировать качество, надёжность и высокий выход годных интегральных микросхем и БИС, если хотя бы один из десяти или ста факторов чистоты технологического процесса производства выпал из-под контроля, т.е. за пределы допустимых значений параметра.

Все ИС и СБИС чувствительны к воздействию загрязнений. Поэтому качество исходных материалов особенно важно. Наиболее чистые современные материалы и технологические среды характеризуются количеством загрязнений по отдельным контролируемым примесям не больше 10^{-6} ат%.

Установлено, что микрочастицы (бактерии) вызывают до 80% всех дефектов, возникающих в процессе производства ИС. Критическим размером микрочастицы считают линейный размер, который составляет не больше 0,1 минимального размера топологического элемента ИС.

Собственно технологический процесс м.б. причиной до 25% дефектов, вносимых в полупроводниковую пластину, оборудование, основные средства автоматизации – до 25% дефектов, газы, химикаты- 8%, воздушная среда технологических помещений – 7%, производственный персонал- 35%.

Основными источниками загрязнений эпитаксиальных подложек является воздух производственных помещений и рабочих объёмов, технологические газы, реактивы, деионизованная вода.

Наиболее опасно присутствие в воздухе частиц размером менее 0,5 мкм. поскольку им свойственно находиться во взвешенном состоянии и они могут оседать на подложки.

Стандартом установлено следующее разделение производственных помещений и рабочих объёмов в зависимости от максимальной концентрации частиц размером менее 0.5 мкм в 1 л воздуха: 0, 5, 35, 350, 1000, 3500, 10000, 35000. Операции окисления, диффузии, наращивания эпитаксиальных слоёв выполняются в рабочих объёмах, концентрация частиц пыли в 1л. воздуха которых составляет не более 5, а вакуумного нанесения диэлектрических и проводящих слоёв – не более 35.

Технологические газы – водород, кислород, аргон, азот и др. дополнительно очищают от примесей других газов и микрочастиц. Так водород, аргон и азот очищают от кислорода и паров воды, присутствие которых вызывает нежелательное окисление подложек при нагреве. Особо

чистый водород получают диффузионной очисткой, пропуская его через мембрану из сплава палладия с серебром.

Качество, применяемых для микроэлектроники жидких технологических сред и химикатов в значительной степени зависит от технологии глубокой комплексной очистки воды. Т.к. вода не только используется в многочисленных операциях отмывки поверхности полуфабриката и готовых изделий, но и служит основой технологических растворов для отмывки и травления. Природная вода перед технологическим применением в микроэлектронике подвергается многократной комплексной очистке, в том числе биологической (от бактерий и вирусов). Критический размер взвешенных частиц для интегральной микроэлектроники 1- 0.5 мкм. Число частиц большего размера д.б. сокращено до 1000 в 1 л. очищенной воды. Для производства СБИС допустимые размеры частиц снижается до 0.1-0.2 мкм и их число – до 20 единиц в 1 л. воды.

В чистых технологических помещениях кроме запылённости (загрязнение микрочастицами) контролируется: степень освещения, влажность воздуха, кратность воздухообмена, скорость и направленность воздушного потока, газовый состав воздуха, степень ионизации воздуха, рабочая температура, количество статического электричества на рабочих поверхностях технологического оборудования, уровень вибраций. Специальные установки кондиционирования воздуха круглосуточно поддерживают относительную влажность в рабочих помещениях от 40 до 60% и температуру 20-26°C.

Как показывают исследования, человек в современной сверхчистой производственной одежде, пройдя все стадии обдува и отсоса частиц, прежде чем попасть в рабочую зону, является всё равно основным источником загрязнений микрочастицами. Человек в повседневной одежде выделяет в окружающую среду не менее $2 \cdot 10^6$ частиц загрязнений в минуту. Одежда персонала должна напоминать костюм космонавта. Количество обслуживающего персонала должно быть сокращено до минимума. В перспективе всё производство должно быть управляемо дистанционно ЭВМ

одним человеком, при использовании новых технологических приёмов, которые позволяют снизить уровень загрязнений.

Любая поверхность, загрязнённая статическим электричеством, притягивает и накапливает микрочастицы. Накопленная пыль при вибрациях, толчках, деформациях, температурном воздействии отрывается и повышает в помещении загрязнённость. В этом отношении представляет интерес материалы, способные сохранить значительный электрический заряд даже при повышенной влажности, например, электреты, способные притягивать пыль из окружающего пространства на расстояния до 50 мм и удерживать её. Снижению уровня статического электричества способствует ионизация воздуха, поступающего из фильтров тонкой очистки, устройствами, которые генерируют попеременно (+) и (–) аэроионы.

Контрольные вопросы

1. Назовите потенциальные источники загрязнений ИС?
2. Какие параметры контролируются в чистых помещениях?
3. Почему статическое электричество является одним из главных параметров, контролируемых при производстве ИС.

2. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЦЕССАМ МАКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

При производстве изделий электронной техники используется большинство известных в современной технологии процессов. Их можно классифицировать по физико-химическим основам: механический, термический, корпускулярный, полевой. По виду процесса: нанесение, удаление, модифицирование. По характеру протекания процессов: тотальный, локальный, селективный, избирательный, анизотропный. По способу активации: тепло, излучение, поле.

Одним из ответственных процессов, определяющих, в конечном счёте, готовое изделие, является получение исходного материала.

После получения исходного материала он обрабатывается сначала механически – резка монокристаллов на пластины, разделение пластин на кристаллы. Затем используются электрофизические методы обработки: ультразвуковые, электроэрозионные, плазменные, лазерные. На основе этих методов создаются наиболее ответственные технологические процессы.

Ультразвуковая технология используется в процессе очистки поверхности, для интенсификации химических и электрохимических процессов, для контроля и диагностики.

Электроэрозионный метод основан на эффекте расплавления и испарения микро порций металла под действием импульсов электрического тока

Плазменный метод используется для нанесения покрытий, формообразования изделий сложной формы, для резки, сварки, плавления. В этом методе используются высокие температуры, до 4000 градусов Цельсия и выше. При таких температурах можно расплавить и испарить практически любые тугоплавкие материалы. Плазма характеризуется энергетической неустойчивостью и электропроводностью. Поэтому можно управлять ею электрическими и магнитными полями. С помощью таких полей можно получить плазменную струю небольшого размера с большой концентрацией тепловой энергии, т. е. сосредоточить большую тепловую мощность в небольших объёмах материалов.

Кроме высокотемпературной плазмы для обработки материалов используют низкотемпературную плазму. Низкотемпературная плазма - слабо ионизированный газ, состоящий из смеси нейтральных и заряженных частиц, + и – ионов, стабильных и возбуждённых атомов и молекул. С помощью низкотемпературной плазмы проводят ионное травление поверхности для удаления загрязнений, создают прецизионные рисунки при производстве интегральных микросхем. Если в качестве рабочего газа использовать не инертный, а химически активный газ, то можно проводить процесс не просто

ионного травления, а ионно - химического травления. Механизм ионно-химического травления представляет собой совместное действие распыления и химической реакции.

В элионной технологии при электронно-лучевой обработке используют тепловую энергию, выделяющуюся при столкновении быстрых электронов или ионов с веществом.

Электронно-лучевая обработка используется не только для сварки и плавки, но и для зонной очистки материалов, для нанесения покрытий и полирования

Ионно-лучевая обработка используется для ионной имплантации (ионного легирования). Ионная имплантация или ионное легирование – это процесс внедрения в материал ионизованных атомов легирующего вещества (бора, фосфора, мышьяка) с энергией, достаточной для проникновения в приповерхностную область вещества. Например, при энергии ионизированных атомов 3-500 кэВ имплантация произойдёт вглубь кремниевой подложки на 10-100 нм. Преимущество технологий ионной имплантации, которая широко используется в микро и нанотехнологии, в том, что она даёт возможность точного управления количеством внедрённых атомов примеси путём последующей термической обработки. Ионно-лучевые методы используются при нанесении покрытий в процессе катодного распыления.

Лазерные методы используются для отжига пластин после ионного легирования, увеличения размеров зёрен в поликристаллическом кремнии, для очистки и улучшения рельефа поверхности, легирования и перераспределения примеси, геттерирования примеси, изменения сопротивления поликристаллических кремниевых проводников, рекристаллизации аморфных и кристаллических слоёв, рекристаллизации слоёв «кремний на диэлектрике», для травления, формирования омических контактов.

Контрольные вопросы

1. Какие технологические процессы используются при производстве электронных схем. Как можно их классифицировать?

2. Перечислите области, где применяются те или иные технологии.

3. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ОСАЖДЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

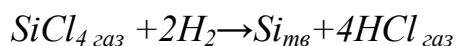
3.1. ОСАЖДЕНИЕ ВЕЩЕСТВА ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

3.1.1. Газофазная эпитаксия

Термин эпитаксия (строится как я) означает ориентированное наращивание слоёв вещества с воспроизведением кристаллической структуры подложки. Эпитаксию применяют в процессах наращивания тонких монокристаллических слоёв на монокристаллических подложках. Образующийся слой закономерно продолжает кристаллическую решётку подложки, если наращиваемый слой и подложка имеют одинаковый химический состав. Такой процесс называется гомоэпитаксией или автоэпитаксией. Если эпитаксиальный слой и подложка состоят из разных материалов, постоянные решётки которых не совпадают, то такой процесс называют гетероэпитаксией. При этом на границе раздела из-за рассогласования решёток возникают дефекты. Поэтому тонкие эпитаксиальные слои трудно получить с хорошей монокристаллическостью.

Процесс осаждения эпитаксиальных слоёв, из газовой фазы называют газофазной эпитаксией. Рассмотрим процесс эпитаксии из парогазовой смеси на примере выращивания кремния. Процесс проводится в реакторе из кварцевого стекла, коррозионно-стойкой стали, хромоникелевых сплавов. Реакторы установок делятся на два типа: горизонтальный и вертикальный. Для выращивания кремния используются четыре кремнийсодержащих реагента: тетрахлорид кремния $SiCl_4$, трихлорсилан $SiHCl_3$, дихлорсилан SiH_2Cl_2 и силан SiH_4 . Наиболее широко используется тетрахлорид кремния $SiCl_4$.

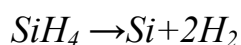
Суммарная реакция состоит в восстановлении кремния из $SiCl_4$ водородом при температуре выше $1100^\circ C$:



Заданный тип проводимости наращиваемой плёнки получается путём введения в парогазовый поток контролируемое количество легирующих примесей.

$SiHCl_3$ и SiH_2Cl_2 являются промежуточными продуктами реакции. Их используют в качестве сырья, т.к. они устойчивы в жидкой фазе при нормальной температуре. Вышеприведённые реакции обратимы и при определённых условиях (при определённой температуре процесса) на подложку наращивается Si , а в других условиях (при более высокой температуре) скорость наращивания становится отрицательной и происходит травление кремниевой подложки.

Наращивание при термическом разложении силана происходит при температуре $900-1100^\circ C$ в результате реакции:



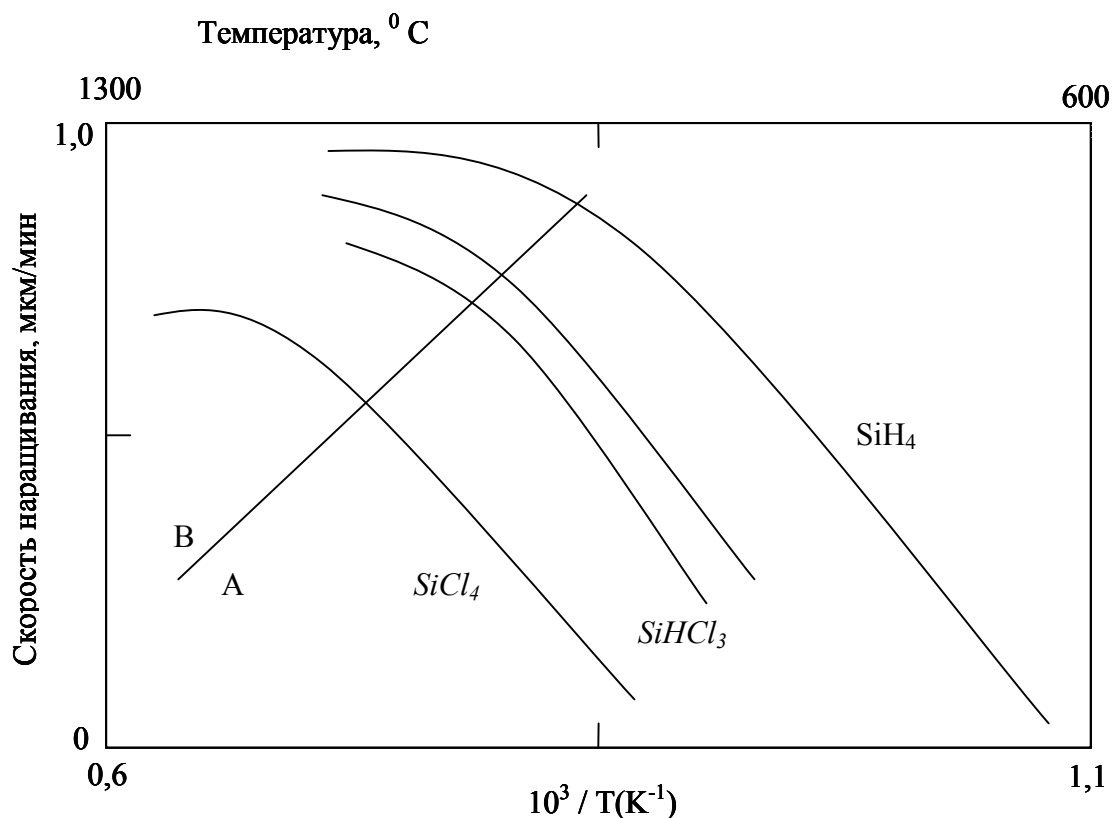


Рис.1. Зависимость скорости эпитаксиального наращивания слоя кремния от температуры при использовании различных реакционных газов.

Зависимость скорости наращивания от температуры приведена на рис. 1

На участке *A* скорость наращивания определяется реакцией в газовой фазе, на участке *B* – процессами диффузии к поверхности подложки. На практике проводится эпитаксия при нормальном давлении газа. В качестве рабочей области выбирается участок *B*, не очень критичный к точному поддержанию температуры. Как видно из рисунка, участок *B* лежит у силана в диапазоне меньших температур, чем для хлористых соединений. Практически наращивание при использовании силана производится при температуре 1000°C.

Конструкция камер для газофазного наращивания представлена на рис.2.

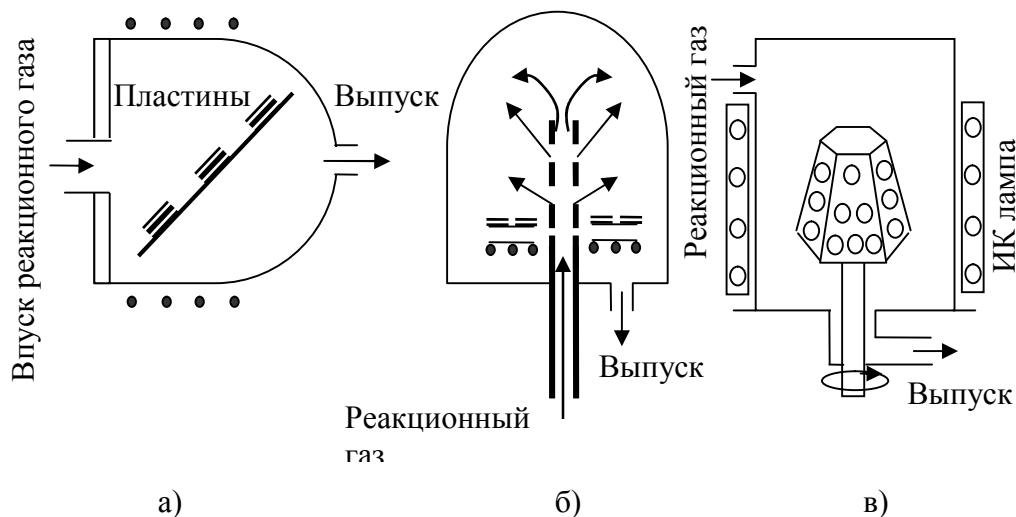
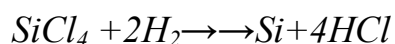


Рис.2. Конструкция реакционных камер для газовой эпитаксии: а – установка с высокочастотным нагревом горизонтального типа, б – установка с высокочастотным нагревом вертикального типа, в – установка с ИК нагревом.

Хлоридный процесс эпитаксии кремния заключается в следующем: монокристаллические кремниевые пластины загружаются в тигель (лодочку) и помещают в кварцевую трубу. Через трубу пропускают поток водорода, содержащий небольшую примесь $SiCl_4$. Поверхность пластин в тигле нагревают до $1200^\circ C$ током высокой частоты. При такой температуре на пластине происходит реакция:



в результате которой на поверхности осаждается слой чистого кремния, а пары HCl уносятся потоком водорода. Процесс, проходящий в потоке газа, называется газотранспортной реакцией. Основной газ H_2 , переносящий примесь в зону реакции, называется газом носителем. Скорость роста плёнки пропорциональна давлению реакционного газа. Все вещества, поступающие в реактор, являются газами, поэтому и название - эпитаксия из газовой фазы или химическое осаждение из газовой фазы. Формирование слоёв эпитаксии

осуществляется при ламинарном течении газа по трубе, т.е., когда число Рейнольдса:

$$R_e = Dvp/\eta = 100$$

меньше критического значения $R_{e_{max}}=2000$, D - диаметр трубы реактора, p - плотность газа, η -коэффициент вязкости пара. Число Рейнольдса- безразмерный параметр, описывающий характер течения газа в реакторе. Для массового производства используется вертикальная камера с ИК нагревом. Поскольку эпитаксиальный слой очень чувствителен к загрязнению на лицевой поверхности подложки, эта поверхность перед проведением эпитаксии подтравливается на глубину несколько мкм в парах HCl . Если используется $SiCl_4 : H_2$, то в количестве молярного отношения больше 0.27, скорость наращивания становится отрицательной и начинается травление подложки. Введение примеси в эпитаксиальный слой проводится добавлением в реакционный газ AsH_3 -арсина и фосфина- PH_3 , если надо получить материал n -типа и для получения p - проводимости в реакционный газ вводится диборан- B_2H_6 . Реакционный газ содержит большое количество водорода, поэтому эти водородные соединения разлагаются медленно. Главным образом их разложение происходит на лицевой стороне подложки. Атомы примеси проникают в подложку, замещая кремний в узлах решётки, и при этом образуются доноры или акцепторы. Количество примеси, вводимое при эпитаксии, зависит от скорости эпитаксиального наращивания. При меньшей скорости вводится больше примеси, а при очень быстром наращивании эпитаксиального слоя процессы адсорбции и десорбции на подложке взаимно уравниваются и концентрация примеси в подложке не повышается. Изменить удельное сопротивление эпитаксиального слоя можно в пределах от 0.01 до 1.5 Ом*см, за счёт изменения содержания легирующих газообразных добавок в реакционной камере. Для получения монокристаллического слоя необходимо сильно нагреть подложку так, чтобы осаждающиеся атомы кремния могли перемещаться в положения, в которых бы они образовывали с подложкой ковалентные связи. При этом атомы должны успеть продолжить

монокристаллическую решётку до того, как они будут покрыты следующим слоём осаждающихся атомов. Это происходит при температуре процесса от 900°C до 1200°C. Обычно скорость роста несколько мкм в мин. Отметим достоинства метода эпитаксиального наращивания.

1. Процесс проводят при температуре, меньшей температуры выращивания слитка монокристалла.

2. Концентрация примеси, их распределение варьируются в широком диапазоне.

3. Возможно получение эпитаксиального слоя с противоположным подложке типом проводимости.

4. Получаемый эпитаксиальный слой содержит меньше дефектов, связанных с примесью кислорода и углерода по сравнению с подложкой.

5. Имеется возможность нанесения однородного по толщине тонкого эпитаксиального слоя на подложку большой площади.

6. Эпитаксиальный слой может быть локально нанесён на определённом участке поверхности подложки. Всё это позволяет формировать ИС разнообразных конструкций и топологий. Очень эффективно сочетание эпитаксии с термической диффузией примеси в подложку и ионной имплантацией. Эпитаксиальное наращивание эффективно применяется для создания скрытого коллекторного слоя, который необходим для обеспечения электрической прочности коллекторного перехода и снижения сопротивления в структуре биполярных ИС.

3.1.2. Получение поликристаллического кремния

Один из методов получения поликристаллического кремния - газофазная эпитаксия. Формирование слоёв поликристаллического кремния производится путём термического разложения силана, происходящее при температуре 620-650°C при нормальном давлении при разбавлении силана

азотом или аргоном или при пониженном давлении до 133 Па при использовании 100%-го силана.

При необходимости проводится отжиг полученного слоя кремния при 900-1000°C. При температуре 600°C зёрна поликристаллического кремния имеют размер до 20 нм при ориентации (110), при температуре 570°C размер зёрен - 10 нм и образуется аморфная фаза. Однако, термообработка полученного слоя (отжиг при температуре 900-1000°C) формирует слой столбчатого кремния с размерами зёрен больше 80 нм и кристаллической ориентации (110). Отжиг при более высокой температуре приводит к преимущественной ориентации зёрен (100).

Конкретные условия процессов наращивания и отжиг определяются в зависимости от заданных свойств получаемого слоя поликристаллического кремния.

Поликристаллический кремний легируется методом ионной имплантации или диффузии, кроме тех случаев, когда он используется как высокоомный материал.

При легировании, проводимом одновременно с наращиванием слоя, удельное сопротивление поликристаллического кремния может быть <0.01 Ом*см, если температура процесса больше 500°C при легировании бором, и при температуре больше 630°C при легировании фосфором.

3.1.3. Получение оксида и нитрида кремния

Наиболее распространённый метод получения оксида кремния - газофазная эпитаксия, при которой происходит газофазная химическая реакция силана и кислорода, протекающая при температуре 500°C.

Этот метод используется в технологии производства ИС даже при формировании алюминиевой разводки. В основном, применяют метод

нанесения SiO_2 при нормальном давлении. Скорость наращивания SiO_2 возрастает при увеличении температуры, и энергия активации невелика. На скорость наращивания Si_2 большое влияние оказывает давление O_2 , так как адсорбция молекул кислорода на поверхности подложки задерживает химическую реакцию. В слоях оксида кремния, выращенных при низкой температуре, содержится водород: ($Si-OH$, $Si-H$, H_2O).

Высококачественный окисный слой получается также путём эпитаксии в результате термического разложения тетраэтоксисилана (ТЭОС), $Si(OC_2H_5)_4$ при низком давлении. Этот процесс протекает при высокой температуре (650-750°C). Поэтому его используют в основном для нанесения SiO_2 –слоя поверх кремния или поликремния с целью сглаживания ступенек и канавок на поверхности подложки. В таких слоях оксида водород почти не содержится.

Слои, легированные фосфином, (PH_3), (фосфоросиликатное стекло, ФСС) играют роль защитных слоёв. Они захватывают примеси металлов, которые проникают в структуру при технологическом процессе. ФСС легко наносится при низкой температуре и его используют в качестве пассивирующего слоя. Этот слой наносится поверх алюминиевой разводки.

Слои нитрида кремния (Si_3N_4), применяемые для защиты лицевой поверхности, формируются методом газофазной эпитаксии при низком давлении. Получаемый таким способом нитрид кремния является аморфным диэлектриком с показателем преломления $n=2,01$ и содержит несколько % H_2 . Качество слоёв нитрида кремния контролируется по удельному сопротивлению (10^6 Ом*см), показателю преломления, скорости травления в плавиковой кислоте HF .

Слои нитрида кремния применяются в современных ИС при локальном окислении в качестве маскирующих слоёв, в качестве изолирующих слоёв запоминающих конденсаторов, в качестве изолирующих слоёв затвора в МНОП – типа ЗУ с сохранением информации при отключении питания, в качестве изолирующих слоёв многослойной разводки, в качестве защитных

слоёв для предохранения лицевой поверхности от проникающих извне молекул воды, атомов щелочных металлов и др. примесей.

3.1.4. Пиролитическое осаждение

Пиролитическое осаждение используют для получения толстых слоёв оксида кремния при низких температурах. Пиролитическое осаждение обеспечивает большую производительность, высокую равномерность слоёв, качественное покрытие уступов металлизации и позволяет создавать изолирующие и пассивирующие слои не только на поверхности кремния, но и германия, арсенида галлия и других материалов. Помимо оксида кремния осаждают слои SiC , Si_3N_4 , ФСС (фосфорно-силикатные стёкла) и поликремния..

При пиролитическом осаждении оксида кремния происходит термическое разложение сложных соединений кремния (алкосисиланов) с выделением SiO_2 , например:

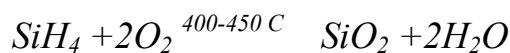
Тетраэтаксисилана



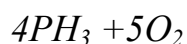
Тетраметоксисилана



Или окисление моносилана



Последнюю реакцию обычно используют и при осаждении фосфорно-силикатного стекла с добавлением к газовой смеси фосфина PH_3 , разбавленного азотом до 1,5%-ной концентрации. Фосфин вступает в реакцию с кислородом



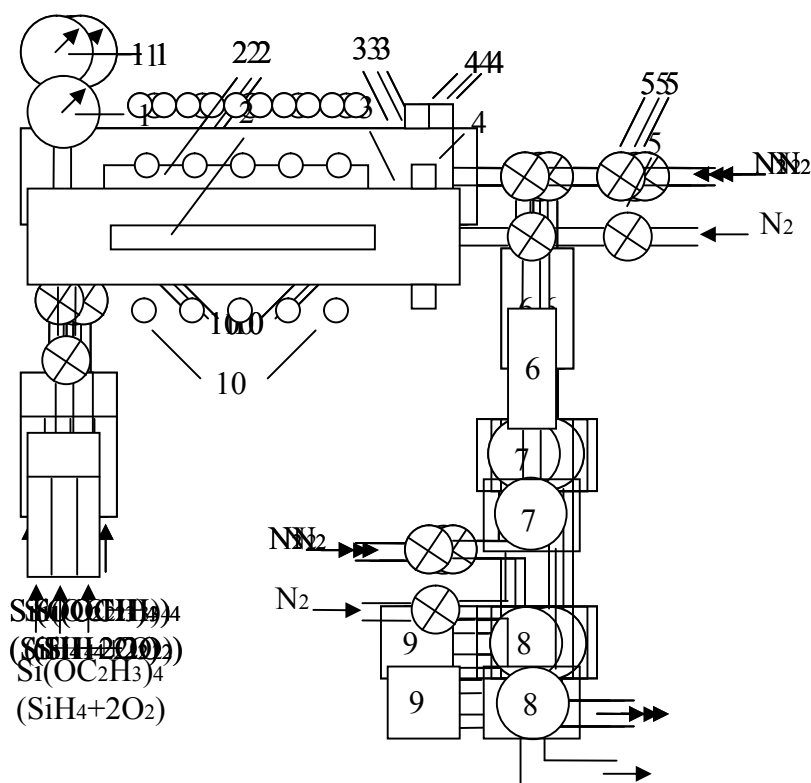


Рис.3. Схема установки для пиролитического осаждения SiO_2 .

1 – датчик давления; 2 – кассета с пластинами; 3 – кварцевый реактор; 4 – водохлаждаемая заглушка; 5 – кран впуска азота; 6 – фильтр; 7 – диффузионный насос; 8 – масляный насос; 9 – очиститель; 10 – резистивные нагреватели.

Установка для пиролитического осаждения, **3** представляет собой трёхтрубную диффузионную печь и имеет реакторы 3 с горячими стенками, работающие при пониженном давлении в режиме непрерывной откачки их объёма. Нагревательный элемент 10 состоит из трёх секций. Пластины устанавливают в кассету 2 вертикально по всей длине рабочей зоны, равной 600 мм.

Газовая смесь поступает с одного конца реактора и откачивается с другого. Предельное разрежение в реакторе установки не выше 0,7 Па, рабочее давление при напуске газов варьируется в пределах от 13 до 670 Па.

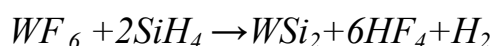
Система откачки реактора имеет диффузионный 7 и паромасленный насосы 8 с очистителем 9, фильтр 6, кран впуска азота 5 и заглушку 4. Датчик 1 контролирует давление в реакторе. Установка работает в автоматическом режиме с выводом на ЭВМ.

В таких установках скорость осаждения SiO_2 составляет 0,2 мкм/ч., ФСС -0,7 мкм/ч. Наиболее важными факторами, определяющие скорость осаждения, являются температура пластин, состав и расход газов, давление в реакторе.

3.1.5. Газофазная эпитаксия тонких слоёв металлов

В кремниевых ИС методом газофазной эпитаксии формируются изолирующие слои, наносятся различные металлы и силициды металлов. Применение поликристаллического кремния в качестве электрической разводки сдерживает повышение быстродействия приборов из-за высокого сопротивления кремния. Поэтому поликристаллический кремний в разводке заменяют тугоплавкими металлами и их соединениями с кремнием. Например, при нанесении вольфрама смесь газов WF_6 и H_2 реагировали при низком давлении в камере газофазной эпитаксии при $350^\circ C$. В результате на поверхности кремния или поликристаллического кремния формируется слой вольфрама. Удельное сопротивление слоя W толщиной 120 нм составляет $1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. При правильном проведении процесса наращивание слоя W происходит только на поверхности Si , а поверх слоя окиси кремния наращивание слоя W совершенно не происходит. Это локальное нанесение слоя W может быть использовано для улучшения контактов электродов, барьерных металлических слоёв и многослойной электрической разводки.

Для получения силицидов (солей кремния) возможно использовать газофазную эпитаксию при реакции:



Получаются слои WSi_2 с удельным сопротивлением в несколько десятков $\text{мкОм}\cdot\text{см}$. (Для сравнения: легированный поликристаллический кремний имеет удельное сопротивление $\rho=1000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$).

Контрольные вопросы

1. Что называется эпитаксией?
2. Какой процесс называется газофазной эпитаксией?
3. Какие реагенты используются для получения Si из парогазовой смеси?
Запишите реакцию восстановления Si из тетрахлорида кремния и из силана.
4. Опишите хлоридный процесс получения кремния.
5. Как очищается подложка перед эпитаксией?
6. Каковы преимущества метода эпитаксиального наращивания?
7. Опишите получение поликристаллического аморфного кремния.
8. Опишите получение оксида и нитрида кремния.
9. Опишите процесс получения тонких слоёв металлов методом газофазной эпитаксии. Для чего они используются в ИС

3.2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

3.2.1. Жидкофазная эпитаксия

Жидкофазная эпитаксия относится к методам выращивания вещества из раствора или расплава. Этот метод используют, если надо получить толстые эпитаксиальные слои или высокие концентрации примесей. Принцип жидкофазной эпитаксии состоит в растворении вещества источника в подходящем растворителе при значительно более низкой температуре, чем температура плавления. Жидкий раствор приводится в контакт с монокристаллической подложкой и медленно охлаждается. В этом случае вся система нестационарна. В процессе охлаждения материал источника рекристаллизуется на подложке. Затем растворитель сливается. При такой методике толщина осаждённого слоя зависит от объёма растворителя, перепада температур при охлаждении и площади поверхности подложки. Устройство для жидкостной эпитаксии.

Эта система проточная, т.е. продуваемая водородом. В кварцевый контейнер – реактор помещают подложку ($GaAs$ и смесь $GaAs$ и Ga). Температуру задают такую, чтобы растворить необходимое количество $GaAs$ в Ga . Затем установку наклоняют таким образом, чтобы раствор первоначально был недосыщен $GaAs$, при этом растворяются поверхностные слои подложки (подложка очищается). Затем температуру раствора доводят до заданного пересыщения $GaAs$ и на подложке кристаллизуется плёнка $GaAs$.

3.2.2. Метод движущегося растворителя

Этот метод жидкофазной эпитаксии отличается от предыдущего тем, что в этом случае система находится в равновесии, т.е. температура сохраняется практически постоянной, а перенос вещества осуществляется за счёт теплового потока. Принцип действия этого метода можно описать на основе схемы:

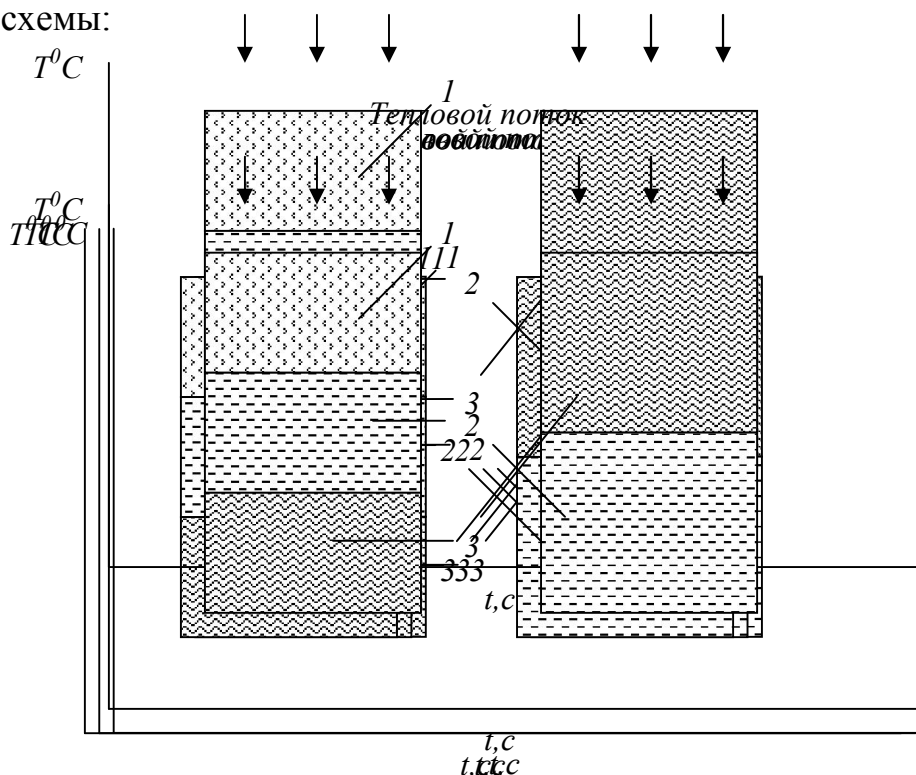


Рис. 4. Жидкофазная эпитаксия. Метод движущегося растворителя или «сэндвич» метод. 1- источник, 2 – растворитель, 3 – подложка.

Система имеет вид сэндвича, в котором между источником и подложкой находится тонкий слой растворителя. Источник находится при более высокой температуре, чем подложка. По мере повышения температуры системы источник и подложка начинают растворяться на границе с растворителем. Поскольку температура источника больше температуры подложки, растворимость источника в растворителе больше, чем растворимость подложки. Избыток вещества источника диффундирует от области источника к области подложки. Таким образом, вблизи подложки создаётся условие перенасыщения и на ней происходит осаждение вещества источника. С течением времени растворённая зона перемещается сквозь источник, пока не достигнет верхней границы. Скорость движения зоны зависит от температуры, от растворимости вещества источника в растворителе и толщины слоя растворителя. Таким способом наращивали *GaAs* на *Si*, используя *Ga* в качестве растворителя.

Контрольные вопросы

1. В чём заключается метод жидкофазной эпитаксии?
2. Рассмотрите методы равновесной и неравновесной жидкофазной эпитаксии.

3.3. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ВЕЩЕСТВА В ВАКУУМЕ ИЗ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ

3.3.1. Вакуум-термическое и электронно-лучевое испарение

Вакуум-термическое испарение применяется для получения тонких металлических и диэлектрических плёнок, используемых в планарных приборах, во внутрисхемных соединениях ИМС.

Отечественная промышленность выпускает сравнительно большое количество модулей нанесения плёнок. Отличаются они размером рабочей

камеры, конструкцией и уровнем автоматизации внутрикамерных устройств, оснащённостью аппаратурой для автоматического измерения вакуума, режима испарения и параметров плёнок в процессе испарения.

Термическое испарение основано на создании направленного потока пара вещества и последующей его конденсацией на поверхности подложек, температура которых ниже температуры источника пара.

Принципиальная схема типовой установки показана на рис.5.

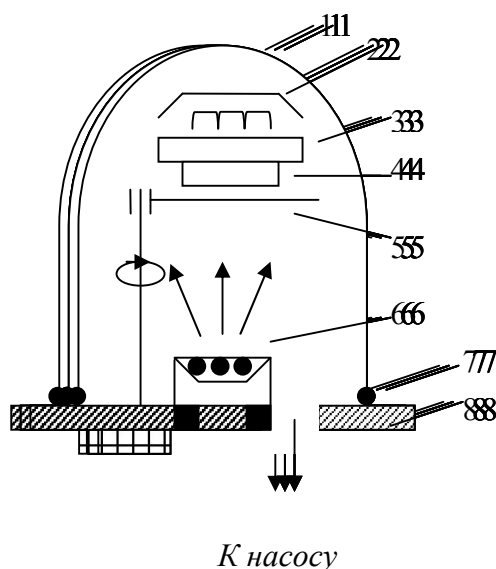


Рис.5. Схема термического испарения в вакууме:
 1 – колпак, 2 – нагреватель подложек,
 3 – подложкодержатель, 4 – подложка,
 5 – заслонка, 6 – испаритель, 7 –
 уплотнительная прокладка, 8 –
 опорная плита установки.

Внутри вакуумной камеры 1 расположены основные функциональные элементы: нагреватели 2 для обезгаживания и подогрева подложек, подложкодержатель 3, подложка 4, маска 5, через которую наносится плёнка заданной конфигурации, испаритель 6, между испарителем и подложкой имеется заслонка 7, позволяющая в нужный момент прекращать подачу испаряемого вещества.

Необходимое разрежение в рабочей камере создаётся вакуумной системой, состоящей из паромасленного насоса с азотной ловушкой и форвакуумной системы.

Процесс термического испарения состоит из трёх основных этапов: испарения вещества, переноса его паров к подложкам, конденсации на них и образовании плёночной структуры.

Для испарения вещество нагревают прямым пропусканием тока, электронным лучом, высокочастотным полем, лучом лазера или электрической дугой. Вначале вещество плавится, а затем переходит в парообразное состояние. Некоторые вещества испаряются из твёрдого состояния минуя жидкую фазу (например Mg , Cd , ZnS). Такой процесс называется сублимацией или возгонкой.

Среди параметров процесса нанесения важнейшими являются скорость нанесения и температура подложки. Скорость нанесения является параметром, наиболее трудно контролируемым и регулируемым.

Если обозначить через N_u поток молекул, покидающих поверхность испарителя, а через N_n –поток молекул, конденсирующихся на подложке, то

$$N_n = K_k(A/d^2)N_u$$

где K_k – коэффициент конденсации, A - коэффициент, учитывающий форму и молекулярно-кинетические характеристики испарителя, d - расстояние между подложкой и испарителем. При постоянном давлении, температуре, объёме скорость конденсации равна скорости испарения - это состояние называется равновесным (состояние насыщения). При этом скорость испарения:

$$v = 0,0585 P_s (M/T)^{1/2}$$

где P_s - давление насыщенного пара, T -температура испарения, M -молярная масса испаряемого вещества.

При нанесении плёнок вещество должно испаряться в молекулярном режиме, так как при этом создаётся молекулярный пучок, частицы которого перемешаются по прямолинейным траекториям от испарителя к подложке без столкновений и рассеяния. Эти условия достигаются при давлении остаточных

паров $P < 10^{-2}$ Па, а насыщенного пара $P_s > 10^2$ Па, т.е. при невысокой скорости испарения.

При $P_s > 10^2$ Па скорость испарения v_u достаточно велика и над поверхностью подложек образуется слой пара, затрудняющий испарение. При $P > 0,01$ также создаются условия для молекулярного режима испарения, т.к. длина свободного пробега λ частиц меньше расстояния между подложкой и испарителем. Согласно кинетической теории газов

$$\lambda = kT / \pi 2^{1/2} p d^2$$

где k -постоянная Больцмана, d -эффективный диаметр молекулы газа.

Для выполнения условия $\lambda \gg d$ и создания прямолинейной траектории движения частиц необходимо давление не выше 10^{-2} Па, т. к. $d=15-20$ мм.

Кроме того, форма молекулярного пучка должна быть такой, чтобы обеспечить максимальную направленность движения частиц испаряемого вещества к подложке. Для равномерного осаждения по толщине плёнки плотность падающего пучка должна быть одинаковой по всей поверхности подложки.

Конденсация паров зависит от температуры подложки и плотности молекулярного пучка.

Температура подложки, выше которой все частицы вещества отражаются от её поверхности и плёнка при этом не образуется, называется критической температурой. Она зависит от физико-химических свойств материалов осаждаемой плёнки и подложки и от состояния поверхности подложки.

Наименьшая плотность, при которой частицы вещества конденсируются на подложке при данной её температуре, называется критической плотностью молекулярного потока. При нахождении молекулами осаждаемого вещества мест, соответствующих минимуму свободной энергии системы молекула-подложка, образуется зародыши. Рост зародышей происходит в результате присоединения новых молекул.

Размер зародыша, при котором он обладает минимальной устойчивостью, называется критическим. При росте и объединении зародышей образуются островковые структуры, а затем – сплошная плёнка.

Электрофизические параметры тонких плёнок, их надёжность и качество зависит от давления остаточных газов p , температуры подложек T_n и испарения и условий термообработки нанесённой плёнки (температуры, времени, среды).

При большом давлении в рабочей камере присутствуют остаточные газы (O_2, H_2, N_2, CO_2) и др., которые не только уменьшают длину свободного пробега молекул, но насыщают плёнку, химически взаимодействуя с ней, образуют соединения, изменяющие первоначальные свойства осаждаемого вещества.

Производительность процесса, возможность химического взаимодействия остаточных газов и испаряемого вещества и условия его кристаллизации на подложке зависит от скорости испарения v_u , которая зависит от температуры. При низких скоростях испарения в пролётном пространстве успевают пройти химические реакции и образуются оксиды, гидриды, нитриды и другие соединения, обладающие другими, чем осаждаемое вещество, свойствами и скоростями миграции по поверхности подложки. В результате этого изменяются условия кристаллизации, структура и электрические параметры осаждаемой плёнки.

Температурой подложки T_n определяется взаимодействие её материала с остаточными газами и интенсивность химического взаимодействия этих газов и материала плёнки. При повышении температуры улучшается десорбция, уменьшается газонасыщение и создаются условия термодинамического равновесия. В результате формируются сплошные и бездефектные плёнки, обладающие хорошей адгезией, имеющие ненапряжённую структуру и оптимальные размеры зёрен. Значительное повышение температуры подложки увеличивает критический размер зародышей и может привести к сохранению островковой структуры, что приводит к неравномерности плёнки по толщине и

ухудшает её электрофизические параметры. Это особенно важно при изготовлении тонкоплёночных резистов (толщина плёнки 0,35-0,6 мкм) Обычно температуру подложки выбирают в интервале от 30 до 400°C.

В зависимости от способа нагрева осаждаемого вещества различают резистивные и электронно-лучевые испарители.

Резистивные испарители изготавливают из проволоки и лент тугоплавких металлов, а также из графита и диборида титана TiB_2 .

Ленточные испарители для устранения тепловой деформации имеют компенсаторы и позволяют испарять сыпучие вещества, и большие, чем проволочные, количества вещества.

Графитовые и из диборида титана испарители применяют для осаждения материалов, имеющих $T > 2200^\circ C$.

В тигельных испарителях из теплостойкой керамики (Al_2O_3 , VO , ThO) устранён непосредственный контакт нагревателя с испаряемым веществом и значительно увеличена загрузка.

Недостатком резистивных испарителей является загрязнение наносимой плёнки материалом испарителя или тигля, малый срок службы, невозможность испарения тугоплавких материалов.

Электронно-лучевые испарители основаны на преобразовании кинетической энергии электронов в энергию нагрева при бомбардировки ими испаряемого вещества. Эти испарители применяются при нанесении плёнок тугоплавких материалов, не загрязняют камеру материалом нагревателя и тигля и могут быть использованы более длительное время, чем резистивные. Однако, при электронной бомбардировке некоторые материалы разлагаются на фракции с выделением газообразных веществ.

3.3.2. Молекулярно-лучевая эпитаксия

Методы молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в вакууме различают по способу генерации пара и вещества и относятся к прямым механизмам наращивания плёнок.

Непрямое наращивание происходит, когда атомы кремния образуются за счёт разложения кремниевых соединений на поверхность нагретой подложки. Прямое наращивание происходит, когда атомы кремния непосредственно попадают на поверхность подложки и осаждаются на ней. Кремниевый источник нагревают электронным лучом. Электроны бомбардируют источник, в результате формируется пучок атомов кремния плотностью $5 \cdot 10^{16}$ ат/см²* с. Подложка нагревается до 400-800°C. На ней осаждаются атомы кремния, двигаясь по поверхности, занимают положения, соответствующие кристаллической структуре подложки. Т.е. эпитаксиальное наращивание состоит в образовании центров кристаллизации и последовательном формировании двумерной решётки из островков, растущих вдоль поверхности. Результирующая скорость роста определяется самым медленным процессом в такой последовательности:

1. Из турбулентного потока атомы кремния проникают путём диффузии в поверхность подложки из кремния.
2. Адсорбция атомов и молекул кремния с поверхностью.
3. Процесс реакции на поверхности.
4. Десорбция продуктов реакции
5. Упорядочение адсорбированных атомов кремния в решётке.

Энергия активации процесса 5 эВ и соответствует энергии активации самодиффузии кремния. Этот метод позволяет получить сравнительно большие скорости роста плёнок при их хорошем качестве и электрофизических характеристиках.

Методы МЛЭ позволяют совместить наращивание плёнки с контролем во время роста структуры и чистоты её поверхности Оже- спектроскопией, а также состава газовой среды масс-спектрометром.

Методы МЛЭ с помощью масок позволяют выращивать на поверхности локальные структуры. Маска в виде плёнки толщиной 10-100 нм с окнами в требуемых местах может быть напылена непосредственно на подложку. Материалами напыляемой маски могут быть оксиды и нитриды кремния. В другом варианте для выращивания трёхмерных структур используются теньевые маски. Механические теньевые маски изготавливают из тугоплавких металлов *W*, *Ta*, *Mo* или из тонких пластин *Si*. Самосовмещённые теньевые маски представляют собой избирательно выгравленые канавки на подложках.

Уникальным свойством МЛЭ является возможность выращивания сверхрешёток полупроводниковых гетероструктур с резкими границами, гладкими на атомном уровне.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой вакуум-термическое испарение? Где оно используется?
2. Рассмотрите процесс вакуум-термического нанесения тонких плёнок. Каковы основные параметры этого процесса?
3. Что называется критической плотностью молекулярного потока?
4. В чём заключается метод МЛЭ? В чём преимущество этого метода?

3.4.ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ОСАЖДЕНИЯ

3.4.1. Катодное распыление

Катодное распыление основано на том, что поток положительно заряженных ионов газа, например, аргона, получивших энергию от сотен электроновольт до единиц килоэлектронвольт, направляют на мишень,

выполненную из распыляемого вещества. Ионной бомбардировкой из мишени выбиваются частицы вещества, которые оседают на подложке в виде тонкой плёнки. Процесс происходит при давлении от 1 до 100 Па.

В зависимости от способов ионизации газа, т.е. создания плазмы и распыления мишени, ионные источники подразделяют на диодные, триодные и магнетронные.

Процесс нанесения тонких плёнок диодной системой распыления заключается в использовании явления разрушения катода в результате его бомбардировки ионизированными молекулами разряжённого газа. Осаждение вещества происходит на подложку, располагаемую на аноде. Если распыляемая мишень металлическая, распыление ведётся на постоянном токе, а если диэлектрическая, при переменном. Во втором случае при отрицательной полярности мишень распыляется. А при положительной с неё снимается накопленный отрицательный заряд.

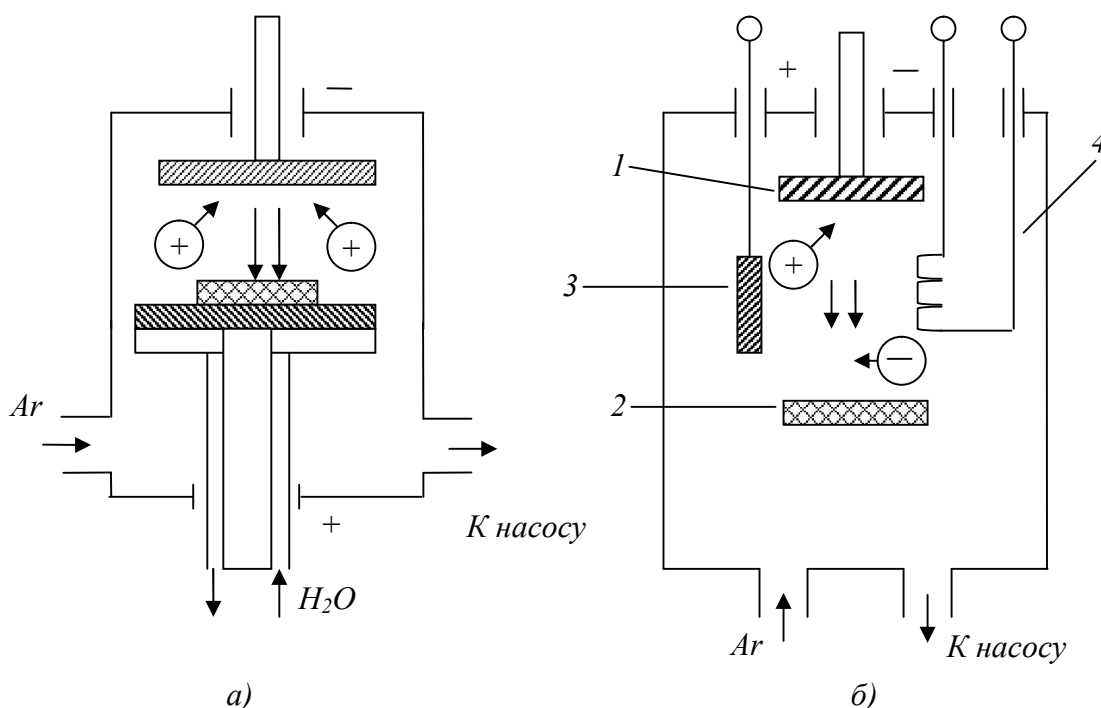


Рис. 6 . Ионные источники испарения:

а – диодный, б – триодный; 1 – катод-мишень, 2 – подложка, 3 – анод, 4 – термокатод.

Диодные системы (рис.6а) состоят из катода –мишени 1, анода 3 и подложки 2, размещённых в рабочей камере, в которой первоначально создаётся вакуум 0,0001-0,00001 Па, затем в камеру напускается инертный газ до давления 1.3-13 Па. При подаче на электроды напряжения 1-5 кВ электроны с катода-мишени устремляются в сторону анода, ионизируя инертный газ, в результате чего возникает нормальный тлеющий заряд и образуется плазма. Положительные ионы плазмы, ускоряясь, устремляются к катоду-мишени, бомбардируют и распыляют её.

Разновидностью диодной системы распыления являются магнетронные источники, используемые для распыления металлов, полупроводников и диэлектриков. Разряд в них возникает в скрещенных электромагнитных полях, в результате чего достигаются высокие скорости осаждения – до 2 мкм/ мин.

На рис.7 приведена схема вакуумной установки для нанесения плёнок магнетронным распылением.

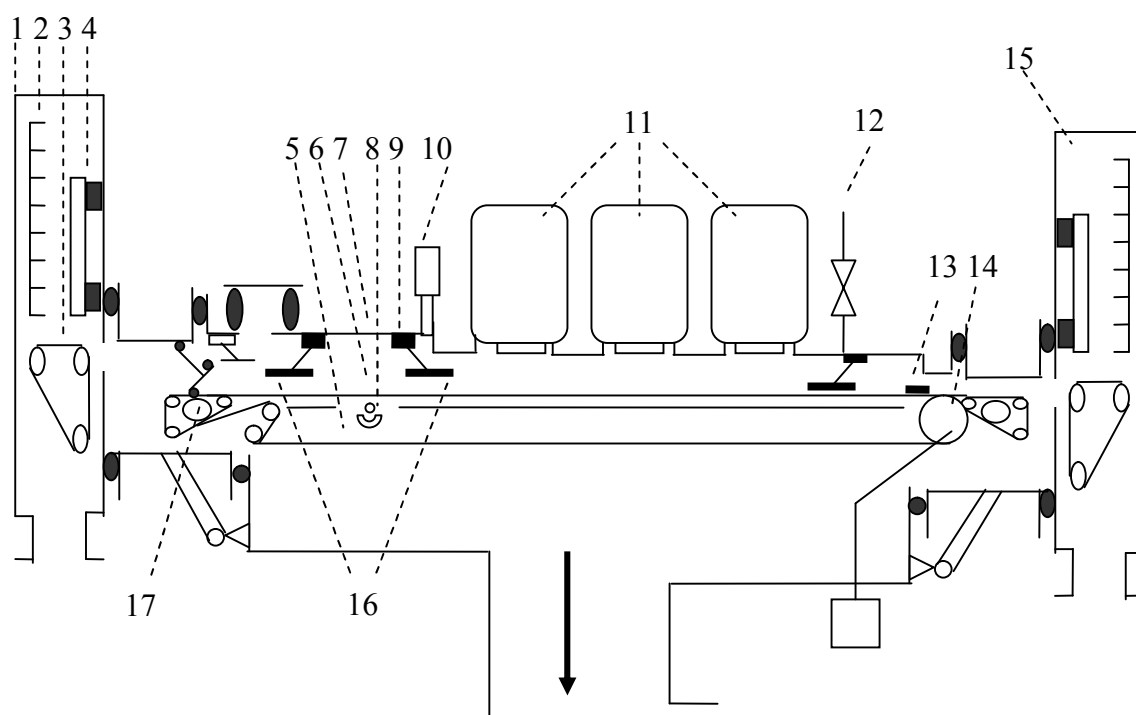


Рис.7. Вакуумная установка непрерывного действия для напыления пленок магнетронным распылением:

1,15 – шлюзовая камера; 2 – кассета; 3 – устройство подачи пластин; 4 – затвор; 5 – рабочая камера; 6 – конвейер; 7 – фланец устройства предварительной ионной очистки пластин; 8 – нагреватель; 9 – диафрагма; 10, 17 – датчики; 11 – магнетронный распылитель; 12 – натекатель; 13 – стол охлаждения пластин; 14 – привод; 16 – щелевые каналы.

В разрядном промежутке одновременно с электрическим действует магнитное поле, что позволяет без увеличения концентрации электронов повысить плотность плазмы. На электроны, эмитированные автоэмиссионным катодом- мишенью 3 и движущиеся к кольцевому аноду 2 в приложенном между ними электрическом поле, действует магнитное поле H , направленное перпендикулярно электрическому. При перекрещивании полей путь движения электронов удлиняется, что повышает вероятность их столкновения с молекулами рабочего газа. В результате при давлении 0.1- 0.01 Па создаётся высокая концентрация ионов газа, которые движутся к катоду-мишени,

бомбардируя её и распыляя с большой интенсивностью. Поток 1 распыляемого вещества устремляется к подложке и осаждается на ней в виде плёнки.

Достоинством магнетронных систем, используемых для распыления металлов, полупроводников и диэлектриков, являются:

Низкое давление, позволяющее уменьшить количество газовых включений в осаждаемой плёнке,

Высокая скорость нанесения плёнки,

Надёжность и стабильность параметров напылительной системы,

Широкий диапазон толщин плёнок при их высокой адгезии и однородности.

3.4.2. Ионно – плазменное распыление

В триодных источниках, называемых также **ионно-плазменными**, третий электрод выполняет функции термоэмиссионного катода, увеличивая концентрацию электронов, а, следовательно, и ионизированных атомов рабочего газа (аргона). Схема установки для ионно-плазменного нанесения плёнок приведена на рис.8.

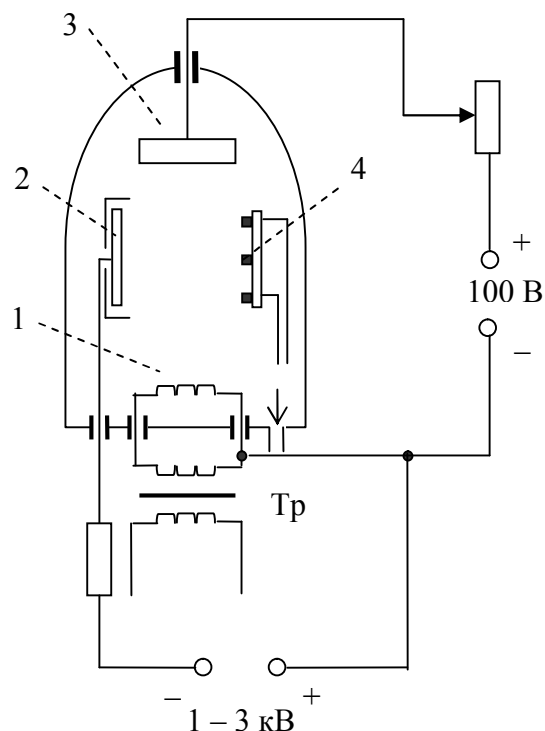


Рис.8. Схема установки ионно – плазменного напыления пленок:
 1 – термоэмиссионный катод; 2 – мишень; 3 – анод; 4 – подложка.

Термоэмиссионный катод 1 является источником электронов. Рабочий газ непрерывно подаётся в рабочую камеру через натекаТЕЛЬ и откачивается вакуумной системой до давления 0.1-0.01 Па, что обеспечивает достаточно чистые условия по сравнению с диодной системой нанесения плёнок. Напряжение между катодом и анодом 3 примерно 100 В. При этом возникает низковольтный дуговой разряд между катодом и анодом.

Медленные ионы, образующиеся в разряде, очищают мишень 2 и подложку 4 от загрязнения перед началом распыления. Для этого на них подаётся небольшой отрицательный потенциал по отношению к потенциалу анода.

Распыление начинается после того, как на мишень подаётся высокое отрицательное напряжение – примерно 1-3 кВ, вытягивающее ионы из плазмы дугового разряда между катодом и анодом. Распылившийся материал мишени попадает на подложку, снабжённую системой нагрева и охлаждения.

Особенностью ионно-плазменного распыления является безинерционность, возможность ионной очистки поверхностей мишени и подложки без встраивания специальной системы электродов.

3.4.3. Получение гидрогенизированного аморфного кремния

Плёнки гидрогенизированного аморфного кремния получают разложением силана, SiH_4 в плазме тлеющего разряда. Подложки, на которые наносятся плёнки гидрогенизированного аморфного кремния, размещают в рабочей камере и пропускают через неё со скоростью от 0,1 до 30 см²/мин смесь из газообразного силана с водородом, возбуждая и поддерживая с помощью электромагнитного поля тлеющий разряд. Разложение молекул силана на атомы водорода и кремния, которые осаждаются на подложки, происходит в плазме тлеющего разряда. В зависимости от способа возбуждения тлеющего разряда различают несколько типов установок нанесения плёнок аморфного кремния. Безэлектродные высокочастотные системы возбуждения и поддержания тлеющего разряда с помощью индуктора, расположенного снаружи рабочей камеры, обычно работают при частоте напряжения питания индуктора в диапазоне от 0,5 до 13,5 МГц (давление силана от 10 до 270 Па) и обеспечивают скорость нанесения плёнок 10-100 нм/мин. Недостаток - неоднородность нанесения плёнок $\alpha-Si:H$, связанная с огромными размерами рабочей камеры.

В двухэлектродной ёмкостной системе этот недостаток устраняется. В такой системе два плоско параллельных электрода размещены внутри рабочей камеры. Для возбуждения и поддержания тлеющего разряда на электроды подаётся напряжение частотой 13,5 МГц. Давление силана составляет 0,7-30 Па. Скорость нанесения плёнок 50 нм/мин. Кроме индуктивных и ёмкостных систем применяют системы, в которых тлеющий разряд создаётся постоянным напряжением, прикладываемым между анодом и подложкодержателем - катодом. Скорость нанесения плёнок уменьшается в 10 раз. Для управления

процессом разложения силана и, стало быть, свойствами получаемых плёнок в области плазмы дополнительно создают электрические и магнитные поля. Легируют плёнки добавлением к силану фосфина (PH_3) или диборана (B_2H_6). Электрические, оптические и фотоэлектрические свойства плёнок зависят от температуры.

3.4.4. Плазмохимическое осаждение

При плазмохимическом осаждении (ПХО) процесс разложения кремнийсодержащих соединений активизируется высокочастотным (ВЧ) разрядом, образующим в газовой среде при пониженном давлении низкотемпературную кислородную плазму. Плазма состоит из атомов, радикалов, молекул в разных степенях возбуждения, электронов и ионов. Плазмохимическое осаждение проводят при давлении в реакционной камере 66-660 Па и частоте ВЧ-разряда 13.56-40 МГц.

Механизм образования плёнок при ПХО состоит из трёх основных стадий: образования в зоне разряда радикалов и ионов, адсорбции их на поверхности плёнки SiO_2 и перегруппировки адсорбированных атомов. Перегруппировка (миграция) адсорбированных поверхностью атомов и стабилизации их положения представляют важную стадию роста плёнки.

Плазмохимическое осаждение проводят в установках, отличающихся конструкцией подколпачных устройств и систем ВЧ- возбуждения плазмы.

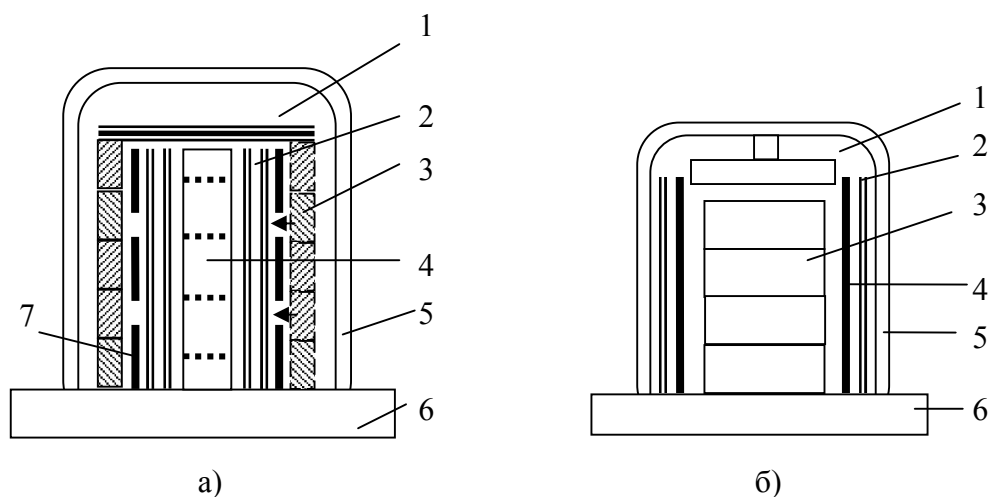


Рис.9. Схема подколпачного устройства плазмохимических реакторов для осаждения SiO_2 установок УВП-2М (а) и УВП-4М (б):

1 – крышка; 2 – электроды; 3 – подложкодержатель; 4 – газораспределители; 5 – колпак; 6 – плитка; 7 – пластины.

В установке на рис.9а реакционная камера представляет коаксиальную систему со штыревыми электродами. Подложкодержатель 3 с крышкой 1 выполнен в виде составной пирамиды из дюралюминия, на внутренней стороне которой крепится пластины 7. Пирамида изолирована от системы ВЧ - возбуждения. Плазма зажигается между стержневыми электродами 2, включенными в сеть ВЧ – генератора. Газовую смесь подают на газораспределитель 4. Подколпачное устройство монтируется на сварной металлической плите 6. Колпак 5 из нержавеющей стали поднимается и опускается гидроприводом.

В установке, рис.9б, стержнеобразные электроды заменены коаксиальными 2, и плазма зажигается между ним и подложкодержателем 3. Скорость осаждения в этой установке почти в два раза выше и составляет 1 мкм/ч. Плёнки имеют самый низкий уровень напряжений по сравнению с полученными термическими и пиролитическими методами осаждения.

Контрольные вопросы

1. Сравните между собой диодное, магнетронное и триодное распыление вещества.
2. Рассмотрите методы получения гидрогенизированного и аморфного кремния.
3. Каков механизм образования плёнок методом ПХО.
4. Чем отличаются между собой установки для ПХО?

4. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ УДАЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

Для изготовления ИС требуются пластины определённой формы, размера и толщины, которые получают, используя операции механической (резка, шлифование, полирование) и химической (очистка, травление) обработки.

4.1. СКРАЙБИРОВАНИЕ

Для разделения пластин используют различные методы **скрайбирования**. Термин «скрайбирование» образован от английского слова scribe- риска, царапина. Алмазное скрайбирование (царапание алмазным резцом) долгое время было единственным методом при разделении пластин.

На смену алмазному в середине 70-х годов пришло лазерное скрайбирование.

Лазерное скрайбирование основано на взаимодействии когерентного излучения с поверхностью полупроводника. Для такого взаимодействия излучение должно иметь длину волны, близкую к полосе поглощения материала. В этом случае излучение поглощается и приводит к нагреву поверхности в области фокального пятна от лазерного пучка до температуры испарения материала. Происходит выброс частиц с образованием углубления (лунки) и одновременным оплавлением его краёв.

При лазерном скрайбировании нужна защита рабочей поверхности пластины от продуктов обработки – частиц испаряемого и расплавленного вещества, которые оседают на этой поверхности с готовыми ИМС и могут явиться причиной их повреждения. Пластины из *GaAs* нельзя скрайбировать лазерным лучом, так как при испарении образуются вредные соединения мышьяка.

При скрайбировании используют твёрдотельный лазер АИГ:*Nd* с длиной волны 1,06 мкм. Лазер работает в режиме модуляции добротности с длительностью импульса 100-500 нс. Каждый импульс обеспечивает формирование лунки размером, близким диаметру фокального пятна. Для образования скрайберной риски эти лунки должны пересекаться. Коэффициент перекрытия зависит от соотношения частоты импульсов и скорости перемещения столика с пластиной. Скорость скрайбирования выбирают в пределах от 100 до 200 мм/с.

4.2. ШЛИФОВАНИЕ И ПОЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИН

Присутствие на поверхности слоя нарушенной структуры ухудшает электрические свойства полупроводника в целом и прибора, в котором используется этот полупроводник. Для того, чтобы удалить дефекты с пластины, она шлифуется различными абразивными составами, как например карборундом, олуном или наждаком. Шлифовка создаёт матовую или зеркальную поверхность и применяется для доведения пластинки до нужной толщины. При шлифовке к образцу добавляется вода. После шлифования пластину обезжиривают, погружая её в 10% раствор щёлочи, подогревая до 90-95⁰С. После этого пластинку полируют абразивными с мелкими зёрнами пастами. Окончательную полировку выполняют субмикронными алмазными пастами (менее 1 мкм) или мягкими полирующими составами на основе оксидов алюминия, хрома, циркония, кремния. Полировку производят на полировальниках, обтянутых сукном, замшей, фетром. Полированная

поверхность имеет деформированный слой, глубина которого порядка 1,5-0,7 мкм в зависимости от полупроводника. Для удаления этих нарушений применяют метод химического полирующего травления. Наилучший способ травления для получения поверхности с наименее нарушенным слоем – электрохимический (анодное травление) в разбавленном растворе щёлочи. Для каждого полупроводника экспериментально подбирается свой травитель.

4.3. ПРОЦЕССЫ ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

4.3.1. Химическое травление

Химическое травление основано на растворении поверхности пластин соответствующими жидкими химическими реактивами (щелочами, кислотами и их солями).

Подбирая травитель, его концентрацию, температуру и время травления, можно регулировать толщину удалённого слоя. Например, при химической полировке пластины кремния, используя соответствующий травитель, можно достичь скорости травления 0,1 мкм/мин, т.е. за 20 сек. снять слой толщиной 30 нм. Травление применяется не только для полировки пластин, но и для локального травления – через защитную маску. При локальном травлении происходит так называемое подтравливание – т.е. травление не только вглубь, но и в стороны - под маску. Стенки вытравленного рельефа получаются не вертикальным и площадь углубления - больше площади окна в маске.

Травители, при обработке в которых самой медленной стадией является химическая реакция, называют селективными (например, *NaOH*, *KaOH*). При этом скорость травления зависит от температуры, а также структуры и кристаллографической ориентации поверхности пластин. Селективные травители, значительно отличающиеся скоростями травления по разным кристаллографическим направлениям, называют анизотропными.

Анизотропным травлением получают микрорельеф (углубления различных конфигураций, мезаобласти) на поверхности полупроводниковых пластин, дифракционные решётки, разделительные канавки для диэлектрической изоляции и др. Обычно это травление является локальным, т.е. выполняется через окна и дорожки в маскирующих плёнках SiO_2 , Si_3N_4 , поэтому его скорость, форма углубления и боковое подтравливание зависят от кристаллографического направления их сторон. Например, при травлении дорожек, ориентированных в направлении $\langle 110 \rangle$ на кремнии с ориентацией (100), можно получить *V*-образные, а в направлении $\langle 100 \rangle$ - прямоугольные дорожки.

Анизотропное травление кремния производят в водном растворе КОН с концентрацией 300-350 г/л. Для арсенида галлия используют кислые или щелочные растворы перекиси водорода и безводные растворы брома в диметилформамиде или метиловом спирте.

Селективное (избирательное) – растворение полупроводникового материала с повышенной скоростью травления в местах выхода на поверхность структурных дефектов. Селективное травление применяют для выявления на поверхности пластин дислокаций, дефектов упаковки, точечных дефектов, линий скольжения, а также микроцарапин и выколов. Благодаря такому травлению они становятся различимыми невооружённым глазом или под микроскопом, поэтому можно определить их вид и плотность.

В качестве травления для пластин кремния ориентации (111) используют смесь из 250 г. хромового ангидрида CrO_3 , 500 мл воды и 500 мл фтористоводородной кислоты HF , а ориентации (100) - бихроматный травитель, состоящий из 22г. $K_2Cr_2O_7$, 500 мл H_2O и 1000 мл HF . Для селективного травления пластин арсенида галлия ориентации (111) применяют травитель, состоящий из 2 ч. воды, 1 ч. CrO_3 , 1ч. HF с небольшой добавкой азотнокислого серебра $AgNO_3$, а ориентации(100) - расплав KOH при 300-350⁰С. Время травления 1-2 мин.

4.3.2. Электрохимическое травление

При электрохимическом травлении через жидкость, которая вступает в реакцию с твёрдым телом, пропускают ток. В качестве анода используется образец - твёрдое тело. Скорость травления регулируется изменением силы тока. Электрохимическое травление является разновидностью обработки в активных средах и основано на химических превращениях, происходящих при электролизе. Основой процесса являются реакции анодного окисления (растворения) и катодного восстановления. Травление производят в растворах, содержащих HF , при возрастающей плотности тока. Такое травление называют также электрополировкой.

4.3.3. Сухое травление

Кроме травления с использованием жидкости, применяют сухое травление физическое распыление: ионно-лучевое фрезерование, газофазное химическое травление, реактивное ионное травление. В каждом таком методе в электрическом разряде образуются ионы, активные атомы или молекулы.

В методе **физического распыления** в высокочастотном разряде образуются ионы Ar^{++} , которые ускоряются напряжением несколько сотен вольт и бомбардируют лицевую поверхность образца, вызывая его распыление, т.е. распыление поверхности. В методе ионно-лучевого фрезерования в условиях разряда на постоянном токе в присутствии магнитного поля формируется высокоплотная плазма. С помощью сеточного электрода ионы Ar^{++} вытягиваются из участка образования плазмы, ускоряются и образуют пучок, бомбардирующий образец. Эти методы позволяют удалить несколько сотен монослоёв с поверхности кремниевой подложки. и после отжига получить совершенно гладкую поверхность. Эти методы обеспечивают очень низкую избирательность при травлении различных материалов.

При **ионном травлении** пластина кремния помещается в разряжённое пространство, в котором рядом с пластиной создаётся тлеющий разряд. Пространство тлеющего разряда заполнено квазинейтральной электронно-ионной плазмой. На пластину относительно плазмы подаётся достаточно большой отрицательный потенциал. В результате положительные ионы плазмы бомбардируют поверхность пластины и в ней выбиваются атомы с поверхности – происходит травление поверхности. Общее преимущество ионного травления – в его универсальности.

Метод ионного травления позволяет осуществить анизотропное травление. Наименьшая скорость свойственна направлению (111), в котором плотность атомов на единицу площади максимальна. Поэтому при использовании разных специальных анизотропных травителей скорость травления оказывается разной. Т.е. используя эффект анизотропного травления, можно заведомо проектировать рельеф отверстий в ИС не только по плоскости, но и по глубине.

Механизм травления в плазме методом реактивного ионного травления (ионно-плазменное травление) сложен и зависит от материала и структуры слоёв. Газы, которые используются при травлении материалов, подбираются специально и опубликованы в литературе. В электрическом разряде молекулы газа разлагаются, образуя молекулы, ионы, и радикалы, а в случае добавления примесей образуются дополнительные виды молекул, атомов и ионов. Например, для системы SiO_2/Si в случае избирательного травления SiO_2 используют смесь газов: CF_6+H_2 и CHF_3 . Образующийся при разряде фтор удаляется при взаимодействии с молекулой водорода с образованием HF . Реакция фтора и кремния замедляется, CF_2 разлагает SiO_2 с образованием газообразного CO и SiF_4 , что соответствует травлению оксида кремния. В то же время обнажённая лицевая поверхность кремния покрывается пассивирующим слоем полимера наподобие тефлона $C-F$. Реакция травления поликристаллического кремния $n+$ типа, высокоомного поликристаллического кремния и монокристаллического кремния, протекает по-разному при

использовании различных реакционных газов. В поликристаллическом кремнии $n+$ типе в реакции принимает участие электроны. В случае анизотропного травления монокристаллического кремния используется смесь газов CF_3 ($X: F, C$) Cl, Br, CF_3, H) $+Cl_2$. При возбуждении электрического разряда в среде $CF_4 + Cl_2$ образуется $CF_3, CF_3^0, F^+, F^0, Cl^+, Cl^0$, которые сложным образом взаимодействуют с кремнием с образованием продуктов SiF_4 и $SiCl_4$ и т.о. производится травление кремния.

4.3.4. Фотостимулированное травление

Метод реактивно-ионного травления используется при формировании рисунка с размерами элементов порядка 1 мкм. Если необходимо уменьшить размеры элементов, например, в МОП БИС при этом одновременно уменьшается толщина подзатворного окисла и уменьшается глубина залегания перехода. Поэтому в таком случае применение заряженных частиц приводит к увеличению содержания дефектов в полупроводнике и отрицательно влияет на надёжность. В этом случае используют методы травления без заряженных частиц. Одним из таких методов является фотостимулированное травление. В травильную камеру вводится газ Cl_2 , после этого производится облучение $Hg-Cl$ лампой или лазером на эксимерах ($Xe-Cl, \lambda=308$ нм.) При этом поликристаллический кремний $n+$ типа стравливается почти изотропно при облучении светом, распространяемым параллельно поверхности образца, а высокоомный поликристаллический кремний и монокристаллический кремний травлению не подвергается.

Контрольные вопросы

1. Как выполняется лазерное скрайбирование?
2. Каковы разновидности травления?
3. Какие травители применяют для селективного травления поверхности полупроводниковых пластин.

4. По каким признакам разделяют процессы ионно-плазменного и ионно - лучевого травления?
5. Каков механизм фотостимулированного травления?
6. Какие смеси используют при селективном травлении кремния, арсенида галлия.

5. МЕТОДЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВЕЩЕСТВА

5.1. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ОКИСЛЕНИЯ

В технологическом процессе изготовления полупроводниковых приборов и ИС пластины полупроводниковых материалов подвергаются высокотемпературным операциям: окислению и диффузии. Окисление - физико-химический процесс, применяемый для образования на поверхности пластины (подложки) слоя диоксида кремния, который необходим для пассивации p-n-структур, маскирования поверхности от диффузии примеси.

Известны следующие методы окисления: термическое окисление: в сухом кислороде (сухое окисление), в кислороде, содержащем пары воды (влажное окисление), в HCl , при низком давлении, при высоком давлении, в горящем водороде). В кислородной плазме. В тетраэтаксисилане (ТЭОС). В трихлорэтаноле. Анодное окисление.

5.1.1. Термическое окисление

В основе термического окисления при высокой температуре лежит предположение, что кислород и молекулы воды диффундируют внутрь образовавшегося слоя SiO_2 , реагируя с кремнием на границе раздела, и таким образом развивается окисление. При этом предполагается, что в равновесных условиях три потока равны между собой: поток молекул кислорода из газовой фазы к лицевой поверхности окисленного слоя - F_1 (число молекул,

проходящих через единичную поверхность за 1 сек), поток молекул кислорода, диффундирующих внутрь окисного слоя - F_2 , поток молекул, вступающих в реакцию на границе раздела Si/SiO_2 - F_3 . Скорость реакции окисления можно получить из дифференциального уравнения:

$$N \frac{d(d_{ox})}{dt} = F_3 = \frac{K_s C_1}{1 + \frac{K_s}{h} + \frac{K_s d_{ox}}{D}} \quad (1)$$

где d_{ox} - толщина слоя окисла, N -концентрация молекул O_2 , диффундирующих в окисный слой, C_1 - равновесная концентрация кислорода в окисном слое, K_s – константа, получаемая из соотношения:

$$F_2 = K_s C_1$$

h - константа, получаемая из:

$$F_1 = h(C_1 - C_0)$$

C_1 -концентрация O_2 на границе раздела Si/SiO_2 , C_0 - концентрация O_2 на лицевой поверхности SiO_2 , D - коэффициент диффузии O_2 в окисный слой. При сухом окислении: $N=2.2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, при влажном – в два раза больше.



Такая теория неприменима для описания начальной стадии окисления. При $t \gg t_0$ решение (1): $d_{ox}^2 = Bt$ (2) - это параболический закон окисления. (2) показывает скорость диффузии кислорода или молекул воды в окисный слой (диффузионное ограничение скорости наращивания слоя). При достаточно коротком времени окисления, при $t + t_0 \ll A^2/4B$ имеем:

$$d_{ox} = B(t + t_0)/A \quad (3)$$

– эта формула соответствует линейному закону окисления и описывает скорость реакции на границе раздела с кремнием (ограничение скорости наращивания окисного слоя скоростью реакции).

$$B = 2DC_1/N, A = 2D(1/K_s + 1/h) \quad (4)$$

Эта теория основана на собственном экспериментальном материале разработчиков и нашла достаточно хорошее подтверждение на практике.

Например, для сухого окисления *p*-типа подложки со срезом (111) при $t=700 - 1200^\circ\text{C}$, $d_{ox}=25$ нм. При этом B в формуле (2) определяется из выражения:

$$B = K_1 \exp(-E_a/kT)$$

$E_a=1,24$ эВ, а величина $B/A = K_2 \exp(-E_a/kT)$, $E_a=2,0$ эВ.

При влажном окислении E_a принимает значение 0,71 эВ и 1.96 эВ, а $d_{ox}=0.1,24$ эВ и 0,71эВ- значения для энергии активации при диффузии соответственно кислорода и паров воды в двуокись кремния.

Энергия активации 2эВ, близка к энергии разрыва связи *Si-Si* (1.83 эВ).

В самой начальной стадии окисления применяется теория окисления металлов. Согласно этой теории до некоторой определённой толщины окисленного слоя скорость окисления должна возрастать. Эта критическая толщина окисного слоя для окисления O_2 -15 нм, для водяного пара $H_2O >5$ нм, что хорошо согласуется с экспериментально определённым значением d_{ox} (25 нм и 0) соответственно. Многие экспериментальные данные по сухому и влажному окислению описываются эмпирическими формулами для сухого окисления:

$$d_{ox}^2 (\text{мкм}^2) = 21.2t(\text{мин}) \exp\left[-\frac{1.33\text{эВ}}{kT}\right]$$

$T > 1100^\circ\text{C}$,

влажное окисление:

$$d_{ox}^2 (\text{мкм}^2) = 7.26t(\text{мин}) \exp\left[-\frac{0.38\text{эВ}}{kT}\right]$$

$T > 1100^\circ\text{C}$, $t > 5$ мин.

Эти экспериментальные зависимости соответствуют подложке (111).

На подложке со срезом (100) скорость наращивания окисла меньше, чем на подложке (111).

Влажное окисление при высокой скорости наращивания используется для создания толстых слоёв окисла.

Для выращивания подзатворного окисла МДП – транзистора (толщина до 100 нм), когда необходима низкая плотность поверхностных состояний и высокая надёжность применяется сухое окисление.

Обычно кремний окисляют на специальных установках (рис.10).

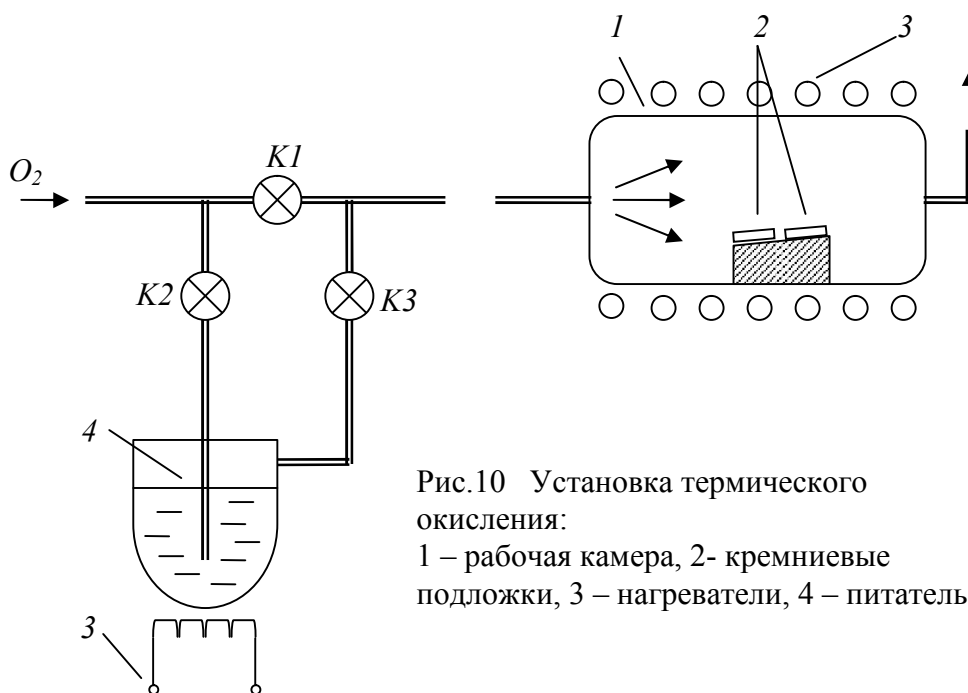


Рис.10 Установка термического окисления:
1 – рабочая камера, 2- кремниевые подложки, 3 – нагреватели, 4 – питатель.

в три стадии: вначале в сухом кислороде в течение 15 мин (кран $K1$ открыт, а краны $K2$ и $K3$ закрыты), затем во влажном в течение 1 ч 45 мин ($K1$ - закрыт, $K2$ и $K3$ - открыты) и вновь в течение 1ч в сухом для уплотнения (подсушивание) образовавшегося слоя SiO_2 за счёт удаления гидроксильных групп $ОН$ и десорбции H_2 .

Недостатком термического окисления кремния при атмосферном давлении и температуре более $1000^{\circ}C$ является «разгонка» примесей в ранее сформированных $p-n$ - переходах при многократном окислении, т.е. сложность

получения резких *p-n* переходов. Уменьшение температуры значительно увеличивает время окисления.

5.1.2. Окисление при высоком давлении

Повышение давления приводит к ускорению окисления. В методе влажного окисления в реакционную камеру с помощью кварцевых труб поступают газы кислород и водород. Водород сжижается и образуется водяной пар под давлением $(5-10) \cdot 10^5$ Па. Необходимость работы с высоким давлением приводит к повышению стоимости оборудования, но тем не менее он чаще стал применяться на практике. По сравнению с обычной *T* окисление при температуре 800-1000°C и $P=5 \cdot 10^5$ Па повышает скорость процесса наращенного слоя окислов в 5 раз. При низкой температуре и малой длительности окисления может быть получен окисный слой с улучшенным качеством, т.к. уменьшается генерация дефектов упаковки в процессе окисления и соответственно уменьшается их отрицательное влияние на характеристики приборов. Именно поэтому в быстродействующих ИС и динамических МОП ЗУ стали использовать толстые окисные слои.

5.1.3. Окисление при пиролитическом разложении тетраэтоксисилана (ТЭОС)

При пиролитическом разложении тетраэтоксисилана (при обычных условиях это жидкость температура кипения которой 165°C, а температура разложения 600-750°C) происходит следующая реакция:

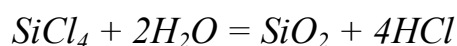
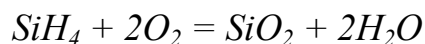
$Si(OC_2H_5)_4 = SiO_2 + R$, где *R*- газообразная смесь оксидов углерода и органических веществ.

При этой реакции температура ниже, чем при термическом окислении кремния, а скорость роста слоя диоксида равна 0.2 мкм/ч. Несоблюдение температурного режима ухудшает маскирующие свойства слоёв диоксида

кремния из-за неполного разложения ТЭОС или появления избыточного кислорода.

Установки для пиролитического разложения отличается от установок термического окисления лишь тем, что в питатель заливают ТЭОС, а вместо кислорода используется аргон.

Разновидностью пиролиза является происходящие при более низких температурах реакция окисления силана ($T=200-250^{\circ}\text{C}$):



Отсутствие газообразных органических радикалов (CH_3 , C_2H_5 и др.) и углерода позволяет наращивать слои диоксида кремния высокого качества.

5.1.4. Плазменное анодное окисление

При обработке подложек в кислородной плазме, полученной в результате электрического разряда постоянного тока или высокочастотного разряда при положительном смещении на подложке и температуре до 600°C получается окисный слой того же качества, что и при термическом окислении. Скорость наращивания окисла в плазме возрастает при повышении температуры подложки и плотности плазмы и может достигать 1мкм/час . Кислородные ионы ускоряют окисление.

Плётки двуокиси кремния выполняют следующие функции:

1. Защиты (пассивации) поверхности и защиты вертикальных участков *p-n* переходов, выходящих на поверхности.
2. Функции маски, через окна которой вводятся необходимые примеси.
3. Функцию тонкого диэлектрика под затвором МОП –транзистора.

Окисные слои применяются в планарной технологии и играют большую роль в процессе литографии, совмещения диффузии примеси, в качестве маскирующих покрытий.

5.1.5. Качество окисных слоёв

1. Электрическая прочность окисного слоя.

Электрическая прочность термического окисного слоя может превышать 10^7 В/см. Однако, на практике окисный слой разрушается при гораздо меньшей напряжённости электрического поля. Тенденция к миниатюризации элементов в МОП БИС приводит на практике к необходимости применения окисных плёнок толщиной 5-20 нм. Для окисного слоя толщиной 10 нм, то при электрической прочности $5 \cdot 10^6$ В/см, максимальная величина напряжения, которое можно приложить составляет 5В.

2. Эффект маскирования.

Окисные слои со вскрытыми в них окнами выполняют в планарной технологии необходимую маскирующую функцию при диффузии и ионной имплантации примеси в кремний. Легирование кремния примесью через вскрытые в защитном слое окна являются предварительной стадией легирования - загонкой примеси. Далее в процессе термообработки при высокой температуре ($>1000^\circ$ С) проводится следующая стадия – разгонка примеси.

3. Перераспределение примеси при окислении.

В процессе окисления кремния, содержащую некоторую концентрацию примеси, в приповерхностном слое кремния формируется граница раздела $Si-SiO_2$ и примесь перераспределяется между окисным слоем и подложкой из-за неравенства химического потенциала кремния и двуокиси кремния. Отношение равновесной концентрации примеси в кремнии и в окисном слое на границе $Si-SiO_2$ называется коэффициентом сегрегации примеси. На практике форма распределения примеси определяется скоростью окисления, температурой и коэффициентом диффузии примеси в подложку. Коэффициент сегрегации зависит от кристаллографического направления кремниевой

подложки, типа примеси и от метода окисления. В случае сухого окисления кремния коэффициент сегрегации больше, чем при влажном окислении. Концентрация примеси на лицевой поверхности подложки оказывает непосредственное влияние на электрические характеристики транзисторов, поэтому необходимо тщательно учитывать перераспределение примеси при окислении.

4. Локальное окисление.

В технологии производства ИС применяют процесс частичного окисления подложки кремния, на отдельные участки поверхности которой нанесён слой нитрида кремния или поликристаллического кремния. Такой способ позволяет формировать на лицевой поверхности подложки высокую степень.

Контрольные вопросы

1. Какой физико-химический процесс называется окислением?
2. Какие методы окисления вы знаете?
3. В чём суть метода термического окисления?
4. Рассмотрите теоретическую модель окисления. Когда применим параболический закон окисления? Когда – линейный?
5. В чём преимущество и недостаток окисления при высоком давлении?
6. Объясните процесс пиролитического разложения легколетучих соединений кремния.

5.2. ДИФФУЗИЯ

Диффузия – это процесс переноса, обусловленный тепловым движением примесных атомов или атомов основного вещества в направлении убывания их концентрации. Диффузия занимает важное место в технологии производства полупроводниковых приборов и микросхем и используется для создания легированных слоёв в полупроводниковых пластинах при образовании активных р-п переходов, межэлементной изоляции, разделения областей и т.п.

При диффузии атомов примеси в кремний атомы примеси, занимающие некоторый узел решётки, движутся путём обмена местами с соседними вакансиями, атомы примеси, внедрённые в междоузлия, движутся по междоузлиям, не занимая узлов кристаллической решётки. В первом случае может иметь место автодиффузия самого кремния. При перемещении примеси в твёрдом теле из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией в направлении X за время t поток примеси J через единичную площадку, прямо пропорционален градиенту концентрации примеси. Уравнение Фика:

$$J = -D \frac{dN}{dX}$$

$$D = D_0 \exp\left[-\frac{E_a}{kT}\right]$$

D - коэффициент диффузии, E_a -энергия активации примеси, D_0 - частотный фактор, зависящий от частоты колебаний решётки, длины пробега примесей. Примеси при малых E_a диффундируют, перемещаясь по междоузлиям.

В качестве легирующих примесей используют элементы 3 и 5 групп таблицы Менделеева. Для кремния это бор B - акцепторная примесь, создающая области p -типа электропроводности, фосфор P , мышьяк As , сурьма Sb - донорные примеси, создающие области n - типа. Диффузия этих элементов происходит, в основном, по вакансионному механизму. Акцепторные примеси диффундируют быстрее из-за меньшего ионного радиуса. Количество примеси, которое можно ввести в пластину, не превышает её предельной растворимости при данной температуре в кремнии (таблица 1).

Таблица 1. Максимальная растворимость примесей в кремнии.

примесь	Максимальная растворим., ат/см ⁻³	Температура °С
алюминий	$10^{19} - 10^{20}$	1150
бор	$5 \cdot 10^{20}$	1200
Фосфор	$1,3 \cdot 10^{21}$	1150
сурьма	$6 \cdot 10^{19}$	1300
мышьяк	$2 \cdot 10^{21}$	1150
золото	10^{12}	1300

Важное значение имеет диффузия неконтролируемых примесей (меди, железа, золота, алюминий и др.), которые могут попадать в приповерхностный слой полупроводниковых пластин из оснастки, отмывочных сред и т.д. Скорость диффузии этих примесей, относящихся к 1 и 8 группам периодической системы, на несколько порядков выше, чем легирующих, и может привести к нежелательным изменениям свойств активных областей приборов. Это определяет жёсткие требования к чистоте проведения диффузионных процессов, исключающие возможность попадания в рабочий объём диффузионного реактора неконтролируемых примесей.

Источники легирующих примесей могут быть твёрдые, жидкие и газообразные. Так источники бора твёрдые B_2O_3 и H_3BO_3 , жидкий BBr_3 , газообразные – галогениды бора BCl_3 , BF_3 , BI_3 и диборан B_2H_6 .

Источниками фосфора являются : твёрдые P_2O_5 , фосфаты аммония $NH_4H_2PO_4$ и $(NH_4)_2HPO_4$, жидкие- $POCl_3$, PBr_3 и PCl_3 , газообразный – фосфин PH_3 .

В качестве источников сурьмы применяют: твёрдые источники – триоксид сурьмы Sb_2O_3 , газообразный SbH_3 (стибан).

Диффузия – это объёмный процесс, т.е. вещество перераспределяется в объёме исходной подложки полупроводника по трём направлениям. Диффузию

проводят из неограниченного (бесконечного, постоянного) или из ограниченного (конечного) источника примеси.

При диффузии из неограниченного источника количество примеси, уходящей с поверхности подложки в её объём, равно количеству примеси, поступающей на неё извне. При этом поверхностная концентрация примеси остаётся постоянной, но резко убывает по глубине p - n перехода (рис.11а).

Диффузия из ограниченного источника примеси проводят в две стадии. Вначале в тонком приповерхностном слое подложки создают концентрацию примеси N_0 (загонка примеси) при температуре 950-1050⁰С в окислительной атмосфере. Затем на поверхность подложки наносят слой, коэффициент диффузии данной примеси в котором значительно меньше, чем в подложке (например, слой SiO_2 на подложке Si), и нагревают такую структуру до высокой температуры. При этом происходит диффузии примеси вглубь пластины (разгонка или диффузионный отжиг) и поверхностная концентрация N_0 примеси уменьшается, а глубина проникновения в полупроводниковый материал увеличивается до заданной величины. Создаётся требуемая диффузионная область. Температура второй стадии выше 1050- 1230⁰С.

Графически распределение примеси при диффузии из ограниченного источника показана на рис.11б.

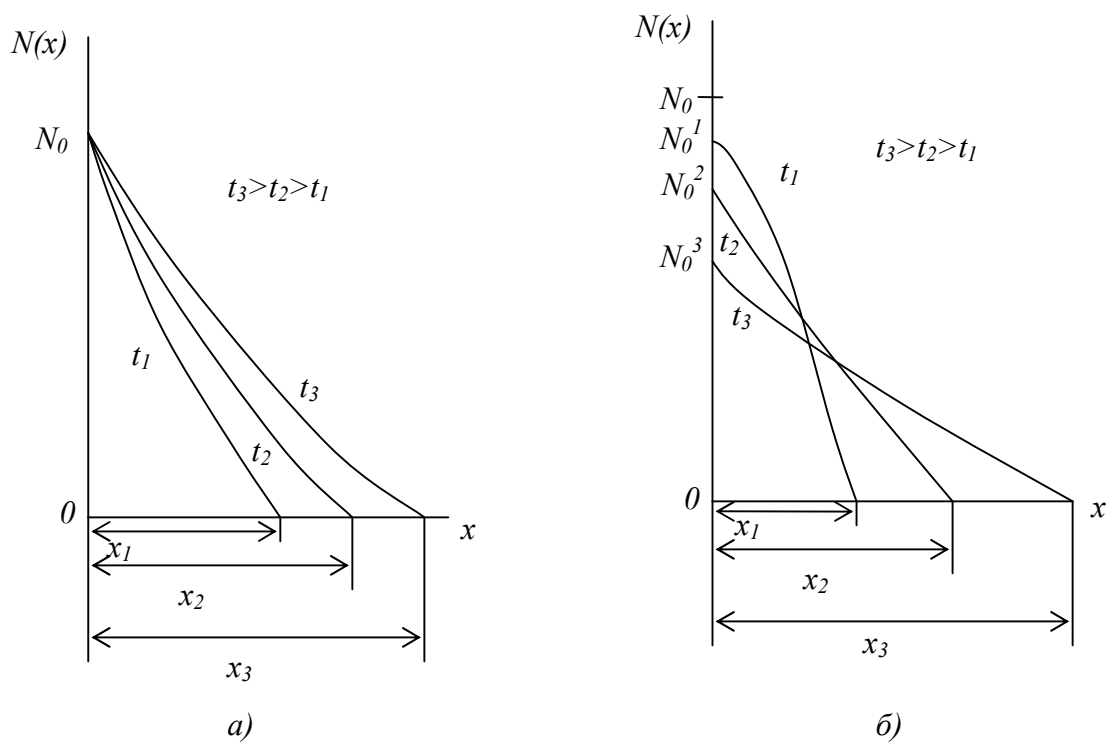


Рис.11. Распределение примеси при диффузии из постоянного (а) и ограниченного (б) источников.

Диффузию проводят на установках в закрытой, открытой или полуоткрытой трубе (рис.12).

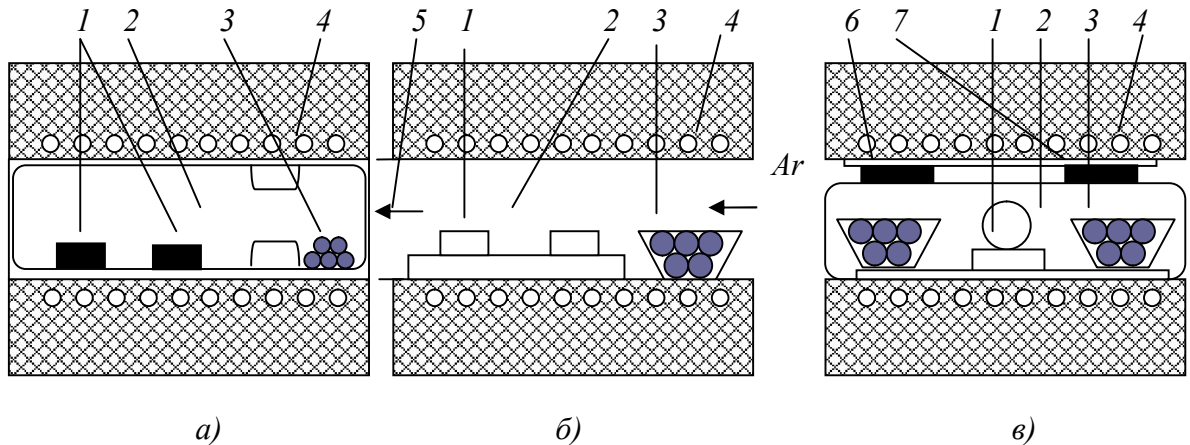


Рис.12. Схемы поведения диффузии в закрытой (а), открытой (б) и полукрытой (в). 1 – кремниевая подложка, 2 – кварцевая труба, 3 – диффузант, 4 – печь, 5 – выходной конец трубы, 6 – кварцевая муфта, 7 – уплотнение.

При первом способе, рис.12а, подложка 1 и диффузант 3 загружают в кварцевую трубу 2, которую вакуумируют и в виде герметичной ампулы помещают в печь 4.

При втором способе, рис.12б, входной и выходной 5 концы трубы 2 сообщаются с атмосферой. Для уменьшения загрязнения подложек примесями из атмосферы на выходном конце трубы устанавливают вытяжную систему.

При третьем способе, рис.12в, кассету с пластинами 1 и лодочки с диффузантом 3 (диоксид кремния с необходимой примесью) помещают в трубу 2, выполненную в виде двух половин, каждая из которых представляет собой кварцевый стакан с полукрытым дном. Затем обе половины соединяют встык, закрепляют кварцевой муфтой 6 с уплотнением 7 из платиновой фольги и помещают в печь 4. При нагреве кислород, поступающий через микрозазоры между уплотнением 7, трубой 2 и её торцами к подложкам, окисляет их поверхность. Одновременно с окислением, примесь из лодочки переходит в слой диоксида кремния, образующийся на поверхности подложек. Насыщаясь примесью, этот слой становится источником диффузии на поверхности подложек.

В закрытой трубе диффузию проводят в одну стадию, а в открытой – как в одну, так и в две стадии, а в полузакрытой – в две.

5.3. ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

Принципиальное отличие методов ионного легирования от термодиффузии заключается в различных способах сообщения энергии атомам примеси: в термодиффузии Ионное легирование (имплантация) представляет собой процесс введения ионизированных атомов примеси в поверхностный слой подложки за счёт сообщения этим атомам большой кинетической энергии (кэВ или мэВ). После торможения ускоренные ионы пучка в материале останавливаются на некоторой глубине, что позволяет изменить первоначальные свойства материала. - за счёт высокой температуры, в ионном легировании – за счёт ионизации паров примесного вещества и ускорения их приложением большой разности потенциалов. Сам процесс происходит при невысокой температуре. Схема установки ионной имплантации

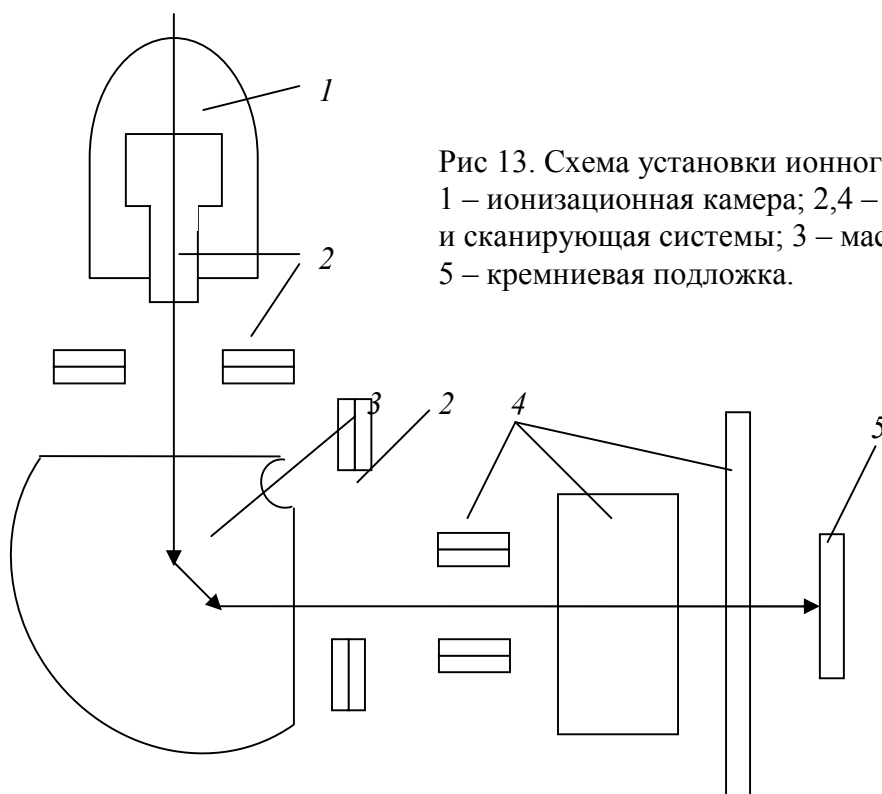


Рис 13. Схема установки ионного легирования:
1 – ионизационная камера; 2,4 – фокусирующая
и сканирующая системы; 3 – масс – сепаратор;
5 – кремниевая подложка.

Ионный источник предназначен для ионизации паров вводимого вещества и экстракции (вытягивание) ионов атомов этого вещества в ионопровод или ускорительную трубку. Он состоит из разрядной камеры, соединённой с ионопроводом или ускорительной трубкой, и устройства вытягивания и фокусировки ионов. Источники ионов должны обеспечить: 1- создание однородного высокоинтенсивного ионного пучка со стабильными во времени параметрами, 2 - получение для данной конструкции плотности ионного тока при максимально низких экстрагирующих напряжениях, 3 - ионизацию как газообразных (BF_3 , BCl_3 , $AsCl_3$, PCl_3 , O_2 , N_2 и т.д.), так и твёрдых (B , As , Sb , Al и т.д.) легирующих элементов, 4 - лёгкую замену легирующих элементов, 5 - первичное формирование пучка различной заданной формы, 6 - простоту в управлении, 7 - надёжность и долговечность. Установка ионного легирования включает также в себя устройства, предназначенные для транспортирования ионного пучка в зону мишени (подложки). Главными параметрами ионного пучка является энергия ионов, интенсивность пучка, характеризуемая плотностью ионного тока стабильность ионного тока во времени и по площади мишени, разряжение и форма пучка в зоне мишени (подложки), высокая чистота пучка, т.е. наличие только строго дозированных легирующих примесей. Общие требования к вакуумным системам установок ионного легирования такие: В системе транспортировки пучка должен поддерживаться вакуум не выше 10^{-3} - 10^{-4} Па. Используемые конструкционные материалы и уплотнения должны обладать малым собственным газовыделением и допускать прогрев до 400-450°C. В системе должен контролироваться и поддерживаться определённый состав остаточной газовой среды. Ионная имплантация имеет следующие характерные особенности: Глубина имплантации определяется энергией ионов. Даже если на лицевой стороне подложки нанесён окисный слой, возможна имплантация примеси в подложку через этот слой. Количество внедрённой примеси можно строго контролировать. Отжиг после имплантации позволяет электрически

активизировать примесь и управлять её концентрацией. Возможна локальная имплантация примесей в подложку путём маскировки участков подложки слоем фоторезиста. Поскольку распространение примеси в поперечном направлении при ионной имплантации очень мало, можно формировать легированные участки очень малых размеров. В условиях отжига возможно очень лояльное легирование примесью. Имплантация ионов высокой энергии приводит к образованию кристаллических дефектов. Полностью устранить этот отрицательный эффект нелегко. Кроме того, существует проблема формирования сквозных каналов, в которых имплантируемые ионы мало подвержены рассеянию (каналы ориентированы вдоль кристаллических осей). Общее количество внедрённых ионов называется дозой.

При токе однозарядных ионов несколько миллиампер за 100с можно ввести в подложку диаметром 100мм дозу легирования 1020-1021 ат/см². Внедряемые ионы фиксируются в подложке, теряя энергию в процессе рассеяния на атомных ядрах и электронах. Мощность торможения иона с энергией E прямо пропорциональна скорости иона E , а влияние массы иона незначительно. Мощность торможения ядрами атомов тем больше, чем больше масса иона. Но в случае малой энергии E иона способность торможения мала из-за эффекта кулоновского экранирования. С ростом энергии E увеличивается и способность торможения. В монокристаллическом кремнии при имплантации в направлении, совпадающем с одной из кристаллических осей, рассеяние ионов очень низкое. Т.е. плотность атомов вдоль этих направлений мала, это приводит к аномально большому пробегу имплантированных ионов. Этот эффект называется формированием сквозных каналов. В *Si* особенно мала плотность атомов в направлении (110). Однако, образование сквозных каналов наблюдается и при использовании направлений (111) и (100). Для устранения этого эффекта залают небольшой наклон направления распространения пучка имплантированных ионов относительно главных осей. Образование кристаллических дефектов и отжиг. В процессе имплантации ионов их энергия переходит в колебания атомов кремния. При этом происходит смещение атомов

кремния из узлов решётки в междоузлия, и т.о. генерируется вакансия. Энергия, требуемая для смещения атомов Si равна 15эВ , а энергия, воспринимаемая от имплантации ионов, гораздо больше. Поэтому возникают обычно 2-3 смещения и образуются пары вакансий и соединение вакансий и примесей. При повышении плотности таких дефектов создаются даже аморфные области. Повышение температуры больше 500°C приводит к образованию дислокаций. Возникновение кристаллических дефектов происходит по-разному в зависимости от того, какие ионы - тяжёлые или лёгкие использовались при имплантации. Например, при введении лёгких ионов B^+ , способность торможения электронами выше, чем способность торможения ядрами атомов, и образование дефектов происходит на большой глубине. При внедрении тяжёлых ионов, например, P^+ , As^+ , способность торможения ядрами увеличивается и образование кристаллических дефектов с высокой плотностью происходит непосредственно в приповерхностном слое подложки. Процесс образования аморфной фазы в приповерхностном слое зависит от массы и количества ионов. Количество имплантируемых ионов, создающих аморфную фазу, уменьшается при увеличении массы иона. Для полного восстановления кристаллических свойств после ионной имплантации необходим отжиг при температуре $900-1000^\circ\text{C}$. Но такая термообработка вызывает термическую диффузию примеси. Избежать этого позволяет отжиг путём мгновенного повышения температуры – процесс термодинамически неравновесный – импульсный отжиг. При отжиге в течение нескольких секунд диффузионная длина примеси не превысит несколько долей микрона. Источниками нагрева при импульсном отжиге могут быть : лазеры, электронный луч, импульсные лампы, галогеновые лампы, графитовые нагреватели. Они обеспечивают нагрев за 100 нс , что не является мгновенным отжигом, но всё же могут быть использованы для формирования «мелких» переходов.

Контрольные вопросы

1. Какие методы легирования полупроводников вы знаете?
2. Какие механизмы диффузии вы знаете?
3. Какие вещества используют в качестве источников примеси при легировании фосфором?
4. При какой температуре проводят вторую стадию диффузии и какую роль эта стадия играет?
5. Какие способы диффузии вы знаете?
6. В чем различие методов ионной имплантации и термодиффузии.
7. Зачем проводится импульсный отжиг?

6. ЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Литографией называется совокупность фото и физико-химических процессов, используемых для послойного формирования топологического рисунка. Более просто - это процесс формирования рисунка. Процессы литографии основаны на использовании высокомолекулярных соединений, называемых резистами, и обладающих способностью изменять свои свойства под действием различного рода излучений. Основными методами литографии являются: фото - (оптическая) литография, рентгенолитография, электролитография и ионолитография. Наиболее широкое применение получила контактная (рис.14) и проекционная фотолитография, с помощью которой в плёночных слоях или непосредственно на подложках создают по заданным рисункам высокоточные рельефы будущего полупроводникового прибора или ИС. Рельефы могут быть сформированы в диэлектрических (Si_2 , Si_3N_4), металлических (Al, Cu, Au, Ni), или полупроводниковых (Si, Ge) слоях.

Литографический цикл состоит из 4 этапов:

1. Формирования фотослоя - нанесение и сушка резиста (фоторезиста).
2. Формирование фото маски, включающее следующие процессы - совмещения и экспонирования, проявления и удаления фотослоя.

3. Формирование рисунка в оксиде и металле, состоящее в травлении оксида или металла.

4. Удаление используемой маски.

6.1. ФОТОЛИТОГРАФИЯ

Фотолитография - это фотомеханический способ изготовления печатной формы плоской печати на заданной поверхности.

Целью фотолитографического процесса является перенос деталей рисунка фотошаблона на поверхность кремниевой пластины, покрытой слоем фоторезиста.

Предварительно нанесённый на поверхность кремниевой подложки 4 со слоем 3 диоксида кремния (рис.14).

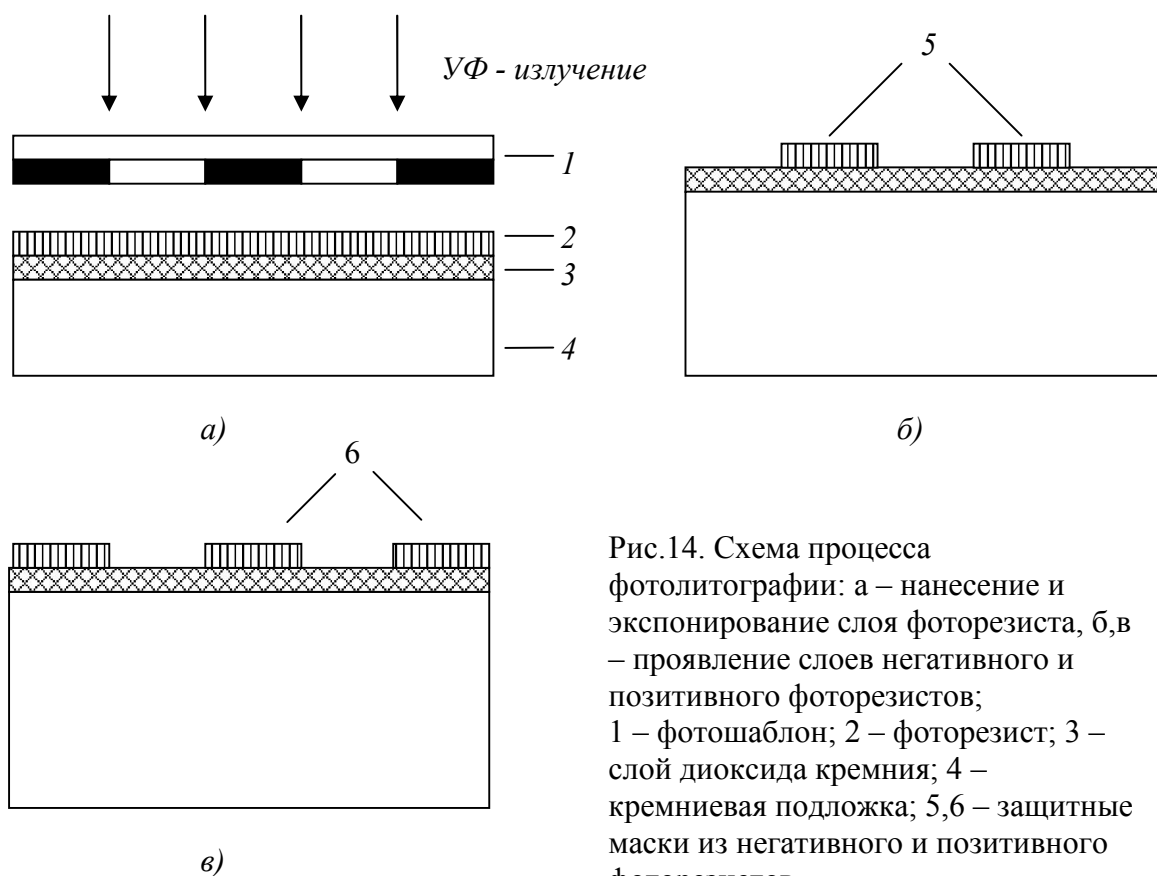


Рис.14. Схема процесса фотолитографии: а – нанесение и экспонирование слоя фоторезиста, б,в – проявление слоев негативного и позитивного фоторезистов; 1 – фотошаблон; 2 – фоторезист; 3 – слой диоксида кремния; 4 – кремниевая подложка; 5,6 – защитные маски из негативного и позитивного фоторезистов.

светочувствительный материал 2, называемый фоторезистом, подвергают воздействию УФ излучения, т.е. экспонируют через специальную стеклянную маску- фотошаблон 1, на который нанесён рисунок в виде прозрачных и непрозрачных для излучения участков. Эти участки образуют топологию одного из слоёв структуры. Различают позитивные и негативные фоторезисты. Под воздействием излучения свойства фоторезиста изменяются и при последующей обработке в специальных химических реактивах, т.е. проявлении, отдельные участки слоя фоторезиста удаляются. Если при проявлении фоторезист не растворяется и не удаляется с участков, на которые воздействовало УФ излучение (рис.15б), его называют негативным, а если растворяется и удаляется (рис.15в), его называют позитивным. Чувствительность негативных фоторезистов выше, чем позитивных, но контраст и разрешение ниже.

Формирование фотослоя, т.е. нанесение фоторезиста является одной из важнейших операций. От качества её выполнения и толщины нанесенного слоя фоторезиста зависит его разрешающая способность, кислотостойкость и адгезия, а также воспроизводимость геометрических размеров элементов изготавливаемых ИС.

Из всех известных методов нанесения фотослоя наиболее широко применяется метод центрифугирования, помещая подложки в центре платформы центрифуги и прижимая их вакуумным присосом. При вращении платформы слой нанесённого на подложки фоторезиста равномерно распределяется по их поверхности толщиной (0.2-20) мкм. Толщина нанесённого слоя фоторезиста зависит от его вязкости и скорости вращения центрифуги (500-8000 об/мин.)

Кроме метода центрифугирования применяют электростатическое нанесение фоторезиста, распыление его специальным пульверизатором, окунание и накатку валками.

При первой сушке фоторезист равномерно распределяется по поверхности и из него удаляются пары растворителя. В конвекционных печах (с подачей

горячего обеспыленного воздуха) сушка фоторезистов в зависимости от их типов продолжается при 80 -120⁰С не более 20 мин. Сушка фоторезистов в ИК и СВЧ – печах значительно короче (минуты и секунды) и обеспечивает высокое качество слоёв (отсутствие пор, трещин, вздутий, отслоений.) Это объясняется тем, что при термической сушке растворитель в первую очередь испаряется с поверхности, т.е. образуется «корка», препятствующая последующему его удалению, что приводит к вздутию и отслаиванию фоторезиста. При ИК- и СВЧ- сушке разогревается поверхность подложки и растворитель вначале удаляется изнутри.

Чтобы сформировать рисунок, нужен шаблон. Установка для переноса рисунка шаблона на подложку называется установкой экспонирования. Возможности установки экспонирования определяются разрешающей способностью рисунка, точностью совмещения рисунка и производительностью (числом подложек, обработанных в единицу времени). Разрешающая способность и точность совмещения в процессе литографии определяют плотность размещения элементов в ИС.

Совмещение фотошаблона с подложкой может выполняться оператором визуально при наблюдении фигур совмещения (рис.15), (контактная фотолитография) или при контроле зазора между ними.

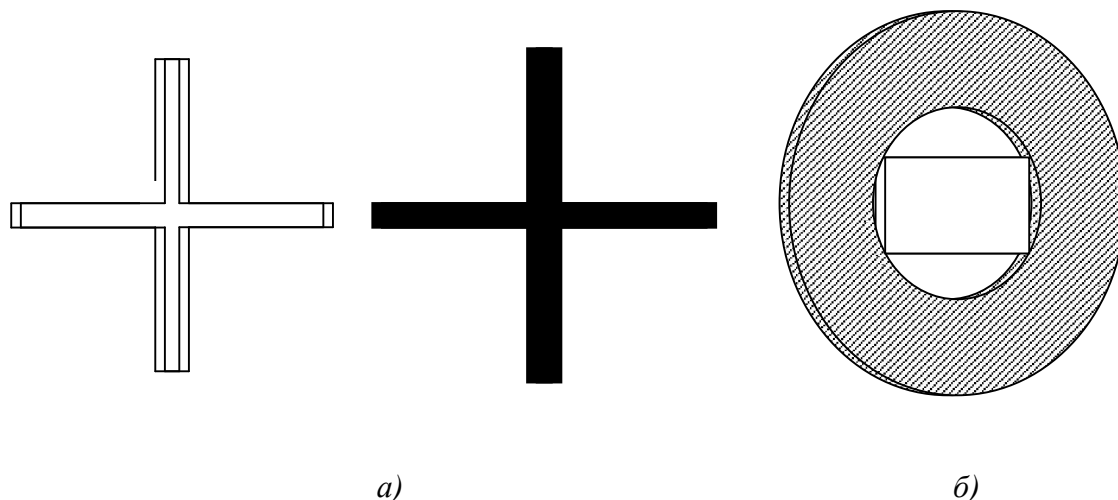


Рис.15. Фигуры совмещения «линия – линия» (а), «точка – линия» (б).

Метод контактной фотолитографии имеет две основные операции: совмещение изображений и экспонирование фоторезиста. При этом методе фотошаблон и пластина кремния плотно прижаты друг к другу.

Метод проекционной фотолитографии заключается в проецировании фотошаблона на пластину кремния, покрытую фоторезистом. При этом между пластиной кремния и фотошаблоном имеется определённый воздушный зазор. Оптические характеристики таких систем ограничены и для повышения разрешающей способности используются источники излучения меньшей длины волны, например, УФ - излучение.

При второй сушке полностью удаляется проявитель и повышается химическая стойкость фоторезиста вследствие завершения процесса его полимеризации и улучшения адгезии к подложке. Эту сушку, как правило, проводят термообработкой при 120-180⁰С в течение 20 мин.

Травление является предпоследней операцией процесса фотолитографии. Служит для формирования в слое фоторезиста заданного рельефа и оказывает

значительное влияние на электрические параметры изготавливаемых приборов и ИС. При этом используемые травители должны быть избирательны, т.е. растворять данный слой и не воздействовать на расположенный ниже.

Удаление фоторезиста является последней и исключительно ответственной операцией процесса фотолитографии, так как от неё зависит качество последующих технологических операций производства полупроводниковых приборов и ИС: окисления, диффузии, нанесения металлических плёнок.

В зависимости от типа фоторезиста для его удаления используют концентрированные кислоты (H_2SO_4 , HNO_3), щёлочи (KOH , $NaOH$) или органические растворители (трихлорэтан, диоксан и др.) Для интенсификации процесса кислотные и органические растворители нагревают до 60-80°C. Кроме того, применяют ультразвуковую и высокочастотную плазменную обработку.

Необходимо отметить, что при контактной фотолитографии размеры получаемых элементов ИС составляют 1 мкм и более. Это объясняется механическими повреждениями рабочих фотошаблонов и подложек, попаданием пылинок и микрочастиц в слой фоторезиста и прокалыванием его, а также налипанием фоторезиста на шаблоны.

Проекционная фотолитография, при которой изображение фотошаблона проецируется через специальный объектив с высокой разрешающей способностью на плоскость подложки, не имеет этих недостатков. В результате увеличивается срок службы фотошаблонов и уменьшается количество дефектов в слое фоторезиста. Кроме того, процесс проекционной фотолитографии можно автоматизировать в большей степени, чем контактной. Вместе с тем, при этом методе предъявляют более высокие требования к плоскостности подложек и однородности толщины слоя фоторезиста. Разрешающая способность проекционной фотолитографии 0.4-1.0 мкм.

6.1.2. Фотошаблон

Во всех установках фото экспонирования используются фото шаблоны. При работе с полупроводниковыми пластинами диаметром 100 мм рисунок наносится на квадратные стеклянные или кварцевые пластины со стороной 125 мм, служащие фотошаблонами. При проецировании без изменения размеров на всю поверхность пластины накладывается фотошаблон и на пластину переносится рисунок множества кристаллов. При проецировании с уменьшением размеров используется фотошаблон, называемый промежуточным, с изображением в 2-10 раз больше реальных размеров рисунка. Промежуточный фотошаблон раньше изготовлялся с помощью генератора рисунка, в котором рисунок формировался экспонированием заготовки фотошаблона вспышкой света через щель с механически изменёнными размерами. Сама щель перемещалась по двум координатам. Затем следовало проявление. Развитие ИС с высокой степенью интеграции привело к тому, что создание фотошаблонов занимало больше 10 часов. (Для этого надо было сделать больше сотен тысяч вспышек) Причём даже один сбой в системе управления засветкой приводил к неисправимому дефекту. Выходом из такой ситуации стало появление метода электронно-лучевого экспонирования и создания установки формирования рисунка шаблона. Этот метод обладает большой производительностью и точностью и позволяет формировать на шаблонах рисунки с очень высокой плотностью линий. Материалом шаблонов является стекло с низким коэффициентом теплового расширения - кварц и др.

6.2. ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ

Электронолитография представляет собой современный высокоразрешающий метод создания топологии микроструктур с использованием электронных пучков в качестве источника излучения.

В основе электролитографии лежит явление нетермического воздействия электронных лучей на материал резиста, чувствительного к потоку электронов.

Излучение ускоренных электронов имеет короткую длину волны, большое фокусное расстояние и легко управляется электрически. В электронно-лучевой литографии различают два основных способа создания рисунка на пластине:

1. Последовательная экспозиция каждого элемента топологии сфокусированным пучком (сканирующий способ).

2. Проекционный способ – передача с помощью электронного пучка сразу всего изображения на пластине.

В обоих способах электронографический процесс сводится к нанесению на поверхность подложки плёнки чувствительного к электронной бомбардировке резиста, последующему экспонированию его электронным пучком и проявлению.

В процессе электронной литографии из производства исключается изготовление промежуточных шаблонов, что существенно упрощает технологию, повышает производительность труда, расширяет конструктивные возможности и снижает стоимость производства.

Основными типами электронно-лучевых литографических установок являются:

1. Однолучевые сканирующие установки растрового типа с пучком кругового или квадратного сечения и векторного типа с пучком кругового или прямоугольного сечения, изменяемого по заданной программе.

2. Многолучевые сканирующие установки.

3. Сканирующие установки векторно - проекционного типа.

4. Проекционные установки с сохранением масштаба изображения и с уменьшением масштаба изображения.

Однолучевые сканирующие установки предназначены для формирования топологии ИС с высокой разрешающей способностью. Эта установка состоит

из 3-х основных функциональных частей: системы формирования пучка заданной формы, системы мультипликации изображения рисунка по поверхности обрабатываемой пластины, системы сканирования пучка в пределах рабочего поля.

Система формирования пучка представляет собой электронно-оптическую систему, в которой поток электронов образуется в результате термоэмиссии с подогреваемого катода или автоэмиссии, с острейного катода, а система линз обеспечивает получение электронного пучка заданной формы и плотности тока.

Система сканирования пучка состоит из совокупности отклоняющих и блокирующей (запирающей луч) систем, которые осуществляют отклонение электронного пучка в пределах рабочего поля и включение – выключение его в соответствие с запрограммированной топологией.

Системой мультипликации изображения является координатный стол с приводом.

В основе работы всех систем электронно-лучевой литографической установки лежит принцип совместного управления системами с помощью универсальной ЭВМ и специализированного программно-вычислительного устройства (СПВУ), которые обеспечивают необходимую последовательность и быстродействие процесса управления литографическим оборудованием.

Для формирования топологии интегральных микросхем применяют два способа перемещения пучка: растровое и векторное. При растровом методе сканирования координатный стол перемещается с постоянной скоростью в направлении одной из координат, в то время как электронный луч сканирует в перпендикулярном направлении. Этот метод обеспечивает высокую скорость экспонирования, если ширина линии больше 2 мкм.

При векторном способе сканирования обработка всей поверхности пластины осуществляется в результате шагового перемещения стола с отклонением и модулированием электронного луча над подложкой таким

образом, чтобы получить требуемое изображение топологии на поле размером от 0.5 * 0.5 до 2*2 мм.

Векторное сканирование более эффективно, т.к. электронный луч перемещается не по всей площади рабочего поля, а только в тех местах, в которых должен быть сформирован рисунок.

Увеличение производительности процесса электронно-лучевой литографии добиваются использованием многолучевых установок.

Группа операций фотолитографии завершается проявлением рисунка, термообработкой (дублированием) плёнки и травлением.

Основным способом проявления является дисперсионное распыление.

Операция травления завершает процесс формирования топологического рельефа на обрабатываемой подложке.

6.3. РЕНТГЕНОВСКАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Рентгеновская литографическая установка является разновидностью оптических установок, где производится экспонирование с зазором. Они разработаны для мягкого рентгеновского излучения в области длин волн (0.5-4,0) нм. Пучок рентгеновских лучей пропускают через шаблон и экспонируют слой резиста. Рентгенолитография, как и оптическая литография, осуществляется путём одновременного экспонирования большого числа деталей рисунка. Но более коротковолновое рентгеновское излучение позволяет создать рисунок с более тонкими деталями, с более высоким разрешением. В рентгеновском диапазоне прозрачные материалы отсутствуют, поэтому оптическими рентгеновскими литографическими установками могут быть отражающие зеркала на основе наногетероструктур и зонные пластинки Френеля с наименьшей шириной зоны около 100 нм и дифракционной решёткой с периодом, равным 100 нм., а в качестве шаблона используется тонкие (<1 мкм) металлические мембраны. В качестве зеркал в рентгеновском диапазоне используются также многослойные наноструктуры из веществ с

высоким поглощением: никель- углерод, (Ni-C, Cr-C, Co-C, Mo-C, W-C) с периодом 4 мм. Слои наносят методом электронно-лучевого и лазерного испарения. По принципу действия многослойные рентгеновские зеркала образуют брэгговское отражение при условии: $d=\lambda/2\sin\alpha$, d - период структуры, α -угол скольжения. При нормальном падении угол скольжения $\alpha=90^0$ и $d= \lambda/2$, поэтому толщина каждого слоя равна $\lambda/4$.

6.4. ИОННО-ЛУЧЕВЫЕ СИСТЕМЫ ЛИТОГРАФИИ

Они обеспечивают разрешение до 10 нм. Для экспонирования полимерных резистов используют лёгкие ионы - протоны или ионы гелия. Использование более тяжёлых ионов даёт возможность проводить легирование подложки или создавать на ней тонкие слои новых химических соединений. Различие между ионной и электронной литографией обусловлены большой массой иона по сравнению с массой электрона и тем, что ион является многоэлектронной системой. Тонкий пучок ионов имеет более слабое угловое рассеяние в мишени, чем пучок электронов, поэтому ионно-лучевая литография обладает более высоким разрешением, чем электронно-лучевая. Потери энергии ионного пучка в полимерных резистах примерно в 100 раз выше, чем потери энергии электронного пучка, поэтому чувствительность резистов к ионному пучку тоже выше. Это означает, что экспонирование резиста тонким ионным пучком происходит быстрее, чем электронным лучом. Образование ионным пучком дефектов типа френкелевских пар “вакансия - междуузельный атом” меняет скорость растворимости диэлектриков и металлов в некоторых растворителях 5 раз. Благодаря этому возникает возможность отказаться от полимерного резиста, т.к. слои материалов сами ведут себя как неорганические резисты.

6.5. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ЛИТОГРАФИЯ

В голографической литографии экспонируемая подложка помещается в область, где интерферируют два лазерных луча, создающих стоячую волну. Этот способ литографии применим в основном для экспонирования рисунков, имеющих периодическую или квазипериодическую структуру. Период экспонированной решётки может составлять половину длины волны лазерного излучения. Решётки, полученные голографической литографией, применяются как дифракционные или фокусирующие элементы для формирования изображения с помощью рентгеновских лучей. Они могут использоваться как элементы нанoeлектронных приборов с размерами (1-10) нм.

В последние годы в США интенсивно ведутся работы по применению в литографии жёсткого УФ с $\lambda=13,5$ нм. Это примерно в 18 раз меньше чем $\lambda=248$ нм глубокого УФ, которая используется в УФ –литографии. Переход с глубокого УФ на жёсткое УФ литографию обеспечивает более чем 10- кратное уменьшение λ и переход в диапазон, где она сопоставима с размерами нескольких десятков атомов. Применение жёсткой УФ – литографии делает возможной печатание линий шириной до 30 нм и формировать элементы структуры размером меньше 45 нм. Поскольку жёсткое УФ излучение хорошо поглощается стеклом, то новая технология предполагает использование системы из 4-х специальных выпуклых зеркал, которые уменьшают и фокусируют изображение, полученное после применения маски. Каждое такое зеркало представляет собой наноструктуру и содержит 80 отдельных металлических слоёв толщиной примерно в 12 атомов, благодаря чему оно не поглощает, а отражает жёсткий УФ. Применение жёсткой УФ литографии позволит создать макропроцессоры, работающие в 30 раз быстрее, чем самые распространённые процессоры Pentium Pro, выпускаемые компанией Intel.

В последнее десятилетие развивается нанопечатная литография и литографически индуцированная самосборка наноструктур.

В нанопечатной литографии изображение образуется в основном за счёт физической деформации резиста штампом, а не с помощью облучения. Литографически-индуцированная самосборка (физические принципы самосборки не ясны) может применяться для создания полимерных наноструктур.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности различных методов литографии?
2. Какие операции и в какой последовательности выполняются при фотолитографии?
3. Какой процесс называется литографией, на чём он основан?
4. Что такое фотошаблон?
5. Что такое электронолитография? Какие у неё преимущества и недостатки?
6. Какие типы электронно-лучевых литографических установок вы знаете?
7. Что представляет собой система формирования пучка и система сканирования пучка?
8. Что такое рентгенолитография? Какие у неё преимущества и недостатки?
9. Что представляет собой голографическая литография? Нанопечатная литография?

7. СБОРКА И ГЕРМЕТИЗАЦИЯ

7.1. СБОРКА МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Под сборкой полупроводниковых приборов и ИС понимают совокупность технологических процессов, при выполнении которых получают готовое изделие.

Технологический процесс сборки и монтажа ИС включает комплекс операций, начиная от контроля параметров приборов на пластине и кончая

контролем герметичности. Доля сборочных операций в общей трудоёмкости изготовления ИС превышает 60%.

Полупроводниковые приборы и ИС собирают по типовой технологии: монтируют кристалл в корпус или на плату, присоединяют электродные выводы, герметизируют корпус или кристалл. Каждый технологический процесс может осуществляться различными методами. Монтаж кристаллов в корпуса или на плату выполняют пайкой (эвтектической, контактно-реактивной, низкотемпературными припоями, стеклом), приклеиванием или механическим креплением. Для присоединения электродных выводов используют термокомпрессионную, ультразвуковую, микроконтактную сварку и пайку. Кроме того, применяют безвыводную сборку (монтаж перевёрнутого кристалла). Герметизацию производят контактной электросваркой, холодной, лазерной, аргонно-дуговой, микроплазменной или электронно-лучевой сваркой, а также пайкой, склеиванием, пластмассой и заваркой стеклом. Сборка ИС после зондового контроля параметров начинают с операции разделения пластин на кристаллы. Для выполнения этой операции в автоматизированном режиме проводят комплекс последовательных операций (формирования спутника-носителя) приклейка полупроводниковой пластины, резка полупроводниковой пластины алмазным диском, мойка и сушка пластин, распознавание кристаллов, разбраковка, укладка годных кристаллов на спутник-носитель.

Разделение на отдельные кристаллы производится методом скрайбирования, т.е. процарапыванием вертикальных и горизонтальных рисок в промежутках между чипами. Процарапывание производится либо с помощью алмазного резца, либо с помощью лазерного луча. После скрайбирования пластинку ломают на отдельные кристаллы, и годные чипы монтируются в корпус.

Перед скрайбированием полупроводниковые подложки закрепляют на эластичной плёнке клеем, наносимым на одну из её поверхностей. После скрайбирования полупроводниковые подложки на эластичной плёнке

прокалывают резиновым валиком, разламывая на кристаллы, а затем плёнку растягивают на пальцах. В результате кристаллы без нарушения ориентации отделяются друг от друга, что необходимо для их захвата при выполнении сборочных операций.

Следующей наиболее важной операцией сборки является монтаж соединительных проводов, включающей следующие операции: присоединение кристаллов, присоединения выводов и нанесения защитных покрытий. Присоединение проволочных выводов из золота к контактными площадкам ИС производится термокомпрессионной сваркой автоматически по заданной программе. Такой автомат оснащён системой распознавания для автоматического считывания информации о расположении кристаллов.

Термокомпрессия – это процесс соединения двух материалов, находящихся в твёрдом состоянии при сочетании достаточного давления (прижатие деталей друг к другу) с повышенной температурой (290-390 °С), при которой происходит диффузия атомов из одной детали в другую. Температура нагрева соединяемых термокомпрессией материалов не должна превышать температуру образования их эвтектики, и один из материалов должен быть пластичным.

При термокомпрессионной сварке образуется хорошая адгезия между полупроводниковым кристаллом и электродным выводом и создаётся надёжный электрический контакт. Чем пластичнее материал электродных выводов, тем большим коэффициентом адгезии он обладает. Золото и алюминий по сравнению с другими материалами используемыми для электродных выводов (медь, серебро), имеет наибольший коэффициент адгезии, соответственно равный 1.84 и 1.80.

В производстве полупроводниковых приборов и ИС термокомпрессией соединяют следующие пары материалов: золото-кремний, золото-германий, золото - алюминий, золото - золото, золото - серебро и алюминий - серебро.

В зависимости от принятого технологического процесса присоединения выводов термокомпрессию разделяют на шариковую, клином и сшиванием.

Наиболее производительной считается шариковая термокомпрессия. При термокомпрессии золотой электродной проволоки к кремневому кристаллу температура нагрева составляет 350-380 °С.

Каждый способ термокомпрессии характеризуется своим отпечатком инструмента на электродном выводе.

Основным достоинством термокомпрессионной сварки является возможность соединения без флюса и припоев металлов в твёрдом состоянии при сравнительно низких температурах и малой их деформации. Кроме того, термокомпрессия обладает сравнительно высокой технологичностью, заключающейся в простоте подбора режимов и изготовлении оборудования и возможности контроля качества сварки.

Недостатки термокомпрессии - ограниченное число пар свариваемых металлов, высокие требования к качеству соединяемых поверхностей, сравнительно низкая производительность труда (обычно сварку выполняют под микроскопом).

7.2. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА

Ультразвуковая сварка - это процесс соединения двух материалов, находящихся в твёрдом состоянии, при незначительном нагреве с приложением определённого давления и колебаний ультразвуковой частоты.

При ультразвуковой сварке температура нагрева в зоне контакта не превышает 50-60% от температуры плавления соединяемых материалов. Контактное давление, подбираемое опытным путём, зависит от механических свойств свариваемых материалов и размеров, изготовленных из них деталей.

Интервал применяемых частот 18-250 кГц. Ультразвуковые колебания, воздействуя на соединение, нагревают его, освобождают от загрязнений и оксидов поверхности в зоне контакта, ускоряя пластическую деформацию электродных выводов. В результате происходит сближение физически чистых

поверхностей на расстояние действия межатомных сил, взаимная диффузия и прочное соединение двух материалов.

При ультразвуковой сварке не используют флюса и припоя, что является её достоинством. Кроме того, этим способом можно соединить разнородные, разнотолщинные и трудносвариваемые материалы.

Прочность соединений, полученных ультразвуковой сваркой, зависит от амплитуды и частоты ультразвуковых колебаний инструмента, контактного усилия, прикладываемого к свариваемым деталям, состояния их поверхностей, времени сварки и мощности колебательной системы.

Микроконтактная сварка- процесс соединения деталей в проводящих материалах пропусканием через них для разогрева импульса электрического тока и приложением некоторого давления.

Микроконтатной сваркой соединяют проволочные выводы из золота, серебра, меди с контактными площадками, покрытыми золотом, медью, никелем, алюминием, серебром, танталом, а также с выводами корпуса (платы), покрытыми этими же металлами. Эту сварку применяют также для соединения отдельных полей металлизации перед нанесением гальванических покрытий и в других случаях.

7.3. ПАЙКА ВЫВОДОВ

Пайкой присоединяют электродные выводы мощных полупроводниковых приборов – транзисторов, выпрямительных, туннельных и СВЧ диодов, а также модулей. Пайка электродных выводов к контактными площадкам кристаллов (плат) и выводам корпусов должна обеспечивать: высокую прочность соединения, минимальное электрическое сопротивление и площадь контакта (не более 0.05-0,1 мм² для выводов диаметром 100 мкм), незначительное изменение физико-химических свойств материалов в месте их контакта в течение длительного времени, отсутствие коротких замыканий и загрязнений, минимальную температуру нагрева, давления и время выдержки.

Для выполнения этих требований пайку выполняют низкотемпературными (мягкими) припоями на основе свинца, олова и индия в термических установках (печах) непрерывного или периодического действия в атмосфере защитного газа и на воздухе. Кроме того, можно производить пайку нагревом (прямым или косвенным) электрическим током или паяльником (электрическим или газовым) Перед пайкой детали тщательно очищают.

7.4. ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНЫХ ВЫВОДОВ

Инструмент, предназначенный для присоединения электродных выводов различными видами сварки, должен обладать высокой механической прочностью и износостойкостью, обеспечивать концентрацию энергии в зоне соединения, визуальный контроль и удобство в эксплуатации.

Инструмент для термокомпрессии в зависимости от того, нагревают его или не нагревают, должен иметь соответственно большую или малую теплопроводность, слабо окисляться при нагреве до 400⁰С и быть химически стойкими к взаимодействию с алюминием и золотом. Термокомпрессионную сварку выполняют с отдельной (от инструмента) или с совмещённой подачей проволоки.

При термокомпрессии с отдельной подачей проволоки используют серийно изготавливаемый инструмент двух типов: конусные и призматические иглы из синтетического корунда (лейкосапфира или искусственного рубина).

При термокомпрессии с совмещённой подачей проволоки в качестве инструмента используют капилляры двух типов с центральным отверстием для сварки встык и внахлест и с боковым отверстием для сварки только внахлест. Материалом для капилляров служит твёрдый сплав ВК6М, реже рубин или вольфрам. Вольфрамовые капилляры применяют для термокомпрессии с импульсным нагревом.

Инструмент для ультразвуковой сварки должен иметь оптимальные форму и размеры и изготавливается из материала, обеспечивающего эффективную передачу энергии ультразвуковых колебаний (высокую скорость их распространения и низкий коэффициент затухания) и не вступающего во взаимодействие с материалом электродного вывода. Наиболее применяемыми материалами являются твёрдый сплав ВК6М, карбиды титана и вольфрама, а также корундовая керамика (алюмооксидная, или глинозёмистая).

Существенное значение для сохранения и передачи резонансной частоты имеет длина инструмента. Оптимальная длина инструмента должна быть 21 мм.

Инструмент обычно затачивают в виде клина длиной не более 2.8 мм, т.к. в этом случае резонансная частота передаётся на его конец и бывает выше, чем в инструменте с постоянным сечением.

Ультразвуковую сварку выполняют как внахлёт, так и встык.

7.5. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИС

Финишной операцией в процессе сборки ИС является герметизация, осуществляемая на автоматизированных модулях. Герметизация производится методом литьевого прессования в многоместной прессформе.

Под герметичностью понимают способность замкнутой конструкции не пропускать газ (жидкость). Герметичность характеризуется допустимой утечкой газа или жидкости, измеряемой в единицах потока. Поток жидкости или газа через микроотверстие выражают единицей объёма при определённом давлении за определённое время, т.е. ($\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$).

Корпуса полупроводниковых приборов и ИС считаются герметичными при натекании гелия не более $1.32 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$. Герметизация является одной из важнейших заключительных операций технологического процесса производства полупроводниковых приборов и ИС, т.к. обеспечивает их надёжность и долговечность при механических и климатических воздействиях

в условиях эксплуатации. От качества выполнения герметизации зависит выход годных изделий.

Подсчитано, что трудоёмкость сборных операций (вместе с герметизацией) изделий микроэлектроники превышает трудоёмкость всех других операций. Забракованные негерметичные приборы представляют собой довольно дорогие и почти готовые изделия, что заставляет с особой тщательностью относиться к процессам герметизации.

Постоянное стремление к повышению компактности, миниатюризации и быстродействия электронных систем вызывает увеличение плотности рассеиваемой мощности, что усложняет теплоотвод от активных элементов, вызывая дополнительные требования к конструкции корпусов и способам их герметизации. Конструктивное исполнение корпусов и их герметизация не менее сложны, чем создание *p-n*- переходов.

Различают корпусную, бескорпусную и комбинированную герметизацию. Выбор способа герметизации зависит от конструкции полупроводникового прибора и ИС и должен обеспечивать механическую прочность изделия при его эксплуатации

При корпусной герметизации предварительно изготавливают элементы корпусов - основания с изолированными выводами, крышки и вспомогательные детали. После монтажа прибора, кристалла или платы на основании корпуса и микроконтактирования выводов присоединяют крышку, в результате чего образуется замкнутый объём.

Разнообразие конструкций и типоразмеров корпусов обусловило применение различных видов пайки и сварки, некоторые из которых уже описаны выше. Рассмотрим другие виды сварки и пайки, наиболее часто применяемые при герметизации.

Контактная электросварка с нагревом сопротивлением. Корпуса полупроводниковых приборов и ИС герметизируют по замкнутому контуру, которую в отличие от других видов сварки называют контактной контурной сваркой (ККС), а в случае применения рельефов - контактной контурно-

рельефной сваркой (ККРС) или электросваркой. Контактное сопротивление электрод-деталь должно быть минимальным, т.е. намного меньше контактного сопротивления между свариваемыми деталями, которое должно быть значительным, особенно, если они изготовлены из материалов, имеющих низкое удельное сопротивление. Контактное сопротивление зависит от состояния поверхностей свариваемых деталей и удельного давления, создаваемого сварочными электродами. ККС имеет свою специфику: выполняется с использованием узких сварочных поясков или рельефов; должна происходить без выплеска металла и прожогов; сварной шов должен иметь хороший внешний вид.

Роликовая (шовная) электросварка является разновидностью контактной и применяется для герметизации прямоугольных корпусов ИС на полуавтоматах.

Аргонно-дуговая сварка является разновидностью электродуговой и выполняется в защитной атмосфере газа (аргона) плавящимся или неплавящимся электродом. При сварке плавящимся электродом электродная проволока одновременно служит электродом и присадочным материалом. При герметизации этим способом кромки крышки и основания корпуса микросхемы под воздействием теплоты электрической дуги оплавляются с образованием сварочной ванны. Охлаждаясь, металл в месте сварки кристаллизуется, и образуется сварочный шов. Основное преимущество аргонно - дуговой сварки – возможность местного (локального) нагрева деталей, а недостаток - повышенное требование к точности их совмещения и изготовления оснастки. Аргонно - дуговой сваркой герметизируют металлостеклянные корпуса со штыревыми выводами, когда периметр соединения больше 50 мкм, а суммарная толщина фланцев 0.2-0.6 мм.

Микроплазменная сварка является разновидностью аргонно-дуговой и отличается от неё большей стабильностью и более высокой температурой столба дуги, получаемой при сжатии её потоком аргона, пропускаемого через сопло ограниченного диаметра. Изменением сварочного тока, угла наклона струи, напряжения, скорости и расхода газа, а также его состава и

геометрической формы струи можно регулировать параметры плазменной сварки.

Электронно-лучевая сварка. Отличием её от других видов сварки является механизм теплопередачи. При обычных видах сварки нагрев соединяемых деталей происходит теплопередачей через их поверхность. При электронно-лучевой сварке тепловая энергия высвобождается в результате торможения электронов в поверхностных слоях твёрдого тела. При определённых условиях сварки проникновение электронов в металл составляет несколько десятков мкм. Фокусируя электронный луч в пятно диаметром 0,005-0,1мм, концентрируют на обрабатываемой поверхности очень большую плотность мощности 10^9 Вт/см².

Достоинством электронно-лучевой сварки является: возможность соединения очень тонких материалов (толщиной до нескольких мкм), высокая чистота процесса, так как он выполняется в вакууме, точные фокусировка и дозирование энергии электронного луча, обеспечивающее выделение большой мощности, что позволяет соединить тугоплавкие, высокопрочные и химически активные металлы и сплавы при значительных скоростях (10-100 м/ч).

Лазерная сварка применяется для герметизации корпусов некоторых гибридных ИС со значительной длиной корпуса, для соединения разнородных, разнотолщинных и тугоплавких (вольфрам, молибден) металлов, а также металлов, обладающих большой теплопроводностью (медь, серебро). Производится в труднодоступных местах или замкнутых объёмах, в любой среде.

Недостатки лазерной сварки – незначительная глубина проплавления соединяемых деталей при средних мощностях излучения, выплески испаряемого металла при использовании мощных лазеров и необходимость удаления образующихся ядовитых газов и ионизированных паров.

Бескорпусная герметизация предполагает совмещение герметизации с формированием корпуса (т.е. его заранее не изготавливают) При этом методе свободное пространство (конструктивные промежутки) между элементами

полупроводниковых приборов и ИС заполняют полимеризующимся электроизоляционным составом (компаундом), который при затвердевании образует монолитную оболочку. Герметизирующие компаунды преимущественно изготавливают на основе эпоксидных, кремний - органических или полиэфирных смол.

Преимущества бескорпусной герметизации – значительное сокращение количества технологических операций, повышение производительности процесса и снижение стоимости изделий. Приборы и ИС имеют меньшие габариты и массу, чем загерметизированные в корпуса. Недостатки этого метода герметизации – слабое уплотнение внешних выводов, различие между ТКЛР изолирующего материала, полупроводника и металла выводов, а также низкая теплопроводность герметиков.

Бескорпусную герметизацию выполняют обволакиванием герметиком, заливкой полимером, а также опрессовкой расплавленным термопластическим или термореактивным материалом.

Обволакивание – наиболее простой способ, при котором каплю герметика наносят на сборку или кратковременно погружают сборку в герметик. Этот способ используют для предварительной защиты изделий перед заливкой или опрессовкой.

Заливку выполняют в специальные литьевые формы из силиконовой резины многократного использования. Заливка может быть свободной или в вакууме.

Литьевое прессование является наиболее совершенным способом создания бескорпусных оболочек, применяемым в серийном производстве. Этот способ основан на использовании разъёмных пресс-форм и пресс- порошков, получаемых из эпоксидных и кремнийорганических смол или их композиций. Расплавленный в специальной камере пресс-порошок подают через литниковые каналы под давлением в формирующие гнёзда. Когда через 3-5 минут давление снимают и раскрывают пресс-форму, изделие выталкивается из неё.

При комбинированной герметизации предварительно изготавливают крышку в виде металлического колпачка, в которую устанавливают сборку с выводом, заливают их компаундом. Так обычно герметизируют толстоплёночные гибридные ИС невысокой степени интеграции.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные процессы сборки ИС. Охарактеризуйте каждый из них.
2. Что такое термокомпрессия?
3. Каков принцип ультразвуковой сварки? Микроконтактной сварки?
4. Какими свойствами должен обладать инструмент для присоединения контактов?
5. Что такое герметизация?
6. Что представляет собой корпусная и бескорпусная герметизация?
7. Как герметизируют корпуса пайкой?

8. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ И ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МИКРО- И НАНО-ТЕХНОЛОГИИ

Основным направлением интенсификации производства полупроводниковых приборов и ИС является автоматизация технологических процессов, которая обеспечивает повышение производительности труда, качества продукции, её конкурентоспособности и снижение себестоимости.

Автоматизация технологических процессов - это комплекс мероприятий по разработке и внедрению прогрессивных технологий и созданию на их основе высокопроизводительного оборудования для выполнения технологических операций без непосредственного участия человека.

Особенностью производства большинства полупроводниковых приборов и ИС является невозможность их качественного изготовления непосредственно человеком, который физиологически не способен осуществлять необходимые

микродвижения и микропозиционирования. Кроме того, при работе человек загрязняет технологическую зону микрочастицами одежды и органических веществ. Всё это определяет направления автоматизации технологических процессов: создание комплексов технологического оборудования, работающего под управлением ЭВМ, использование роботов и манипуляторов для выполнения технологических и вспомогательных операций, а также вакуумных автоматических линий для многооперационной обработки подложек в полностью контролируемой среде. При обработке подложек в полностью контролируемой среде, какой является вакуум в рабочем пространстве линии, уменьшается количество загрязнений, что повышает выход годных структур. Однако, создаваемые на вакуумных автоматических линиях условия непригодны для изготовления тонкоплёночных СБИС и ультра БИС.

Для реализации молекулярно-лучевой эпитаксии, ионно-лучевого осаждения и других современных технологических процессов, а также поверхностно-чувствительных методов контроля созданы сверхвысоковакуумные технологические комплексы, которые являются новым поколением автоматизированных линий. Такие комплексы служат для автоматического выполнения операций очистки поверхности подложек от загрязнений и примесей, формирования тонких плёнок и их металлизации, нанесения диэлектрических покрытий.

Применительно к технологии изготовления полупроводниковых приборов и ИС роботы разделяют по точности манипулирования и степени воздействия на атмосферу рабочих пространств. Ультрапрецизионные роботы обеспечивают точность позиционирования до 0,03 мкм, прецизионные – до 5 мкм, а нормальной точности до 0,15 мкм. По степени газо- и пылевыведения роботы бывают вакуумные, чистые и обычные. Вакуумные роботы существенно не изменяют параметров вакуума, а чистые не ухудшают атмосферу чистых комнат, к обычным роботам не предъявляют требований по герметичности, газо- и пылевыведениям.

Ультрапрецизионные роботы служат, например, для перемещения контрольных зондов на операциях промежуточного контроля подложек, а также применяются на операциях литографии.

Прецизионные промышленные роботы предназначены для микросварки внешних выводов ИС к контактными площадкам кристаллов. Так как при монтаже невозможно очень точно установить кристаллы относительно корпусов, такие роботы оснащены системой “машинного зрения” с телевизионным датчиком, позволяющим определять индивидуальные смещения и разворот кристаллов.

Применение роботов увеличивает производительность труда и снижает брак на операции микросварки.

Наиболее прогрессивным является создание робототехнических комплексных систем, состоящих из технологических установок и роботов, которые могут функционировать автономно, выполняя многократные циклы и легко перестраиваясь на производство новых изделий модулей, встраиваемых в технологические системы и называемые гибкими производственными модулями (ГПМ).

8.1. ИНТЕГРАЦИЯ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Одним из основных направлений интеграции и миниатюризации в электронике является увеличение количества элементов ИС на единице площади в результате уменьшения их размеров.

Другим направлением интеграции является создание ИС осаждением тонких монокристаллических кремниевых плёнок на аморфные изолирующие подложки, например из окисленного кремния. После зонной перекристаллизации получают плёнки высокого качества, предназначенные для формирования элементов ИС, размеры которых менее одного микрона.

Повышение степени интеграции способствует также созданию объёмных или вертикальных многослойных плёночных структур. При этом сформированные структуры одного слоя соединяют плёночной металлизацией и покрывают слоем диэлектрика, на который осаждают ещё одну плёнку полупроводника и формируют в ней структуры, которые соединяют металлизацией второго уровня и т.д.

Перспективным направлением является разработка технологии одновременного изготовления на подложках большого количества однотипных простых структур, соединённых между собой системой перемычек, и программируемых перемычками логических схем. Зондовым контролем определяют годные структуры, адреса которых программируются логическими схемами, и соединяют эти структуры плёночной металлизацией второго уровня в соответствии со схемой создаваемого устройства (например, устройства памяти ЭВМ), а негодные или частично годные отключают пережиганием перемычек. Такие подложки не разделяют на кристаллы, а вырезают из них полученные устройства, размеры которых могут быть, например, 64 x 76 мм. Плотность упаковки таких элементов высока, и поскольку они имеют мало внешних выводов и проволочных соединений, их надёжность во много раз выше, чем выполненных из нескольких ИС.

Однако повышение плотности упаковки элементов ИС и связанное с ним уменьшение их размеров имеют определённые пределы., которые определяются технологическими, физическими и энергетическими барьерами.

8.2. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

Качество изделий микроэлектроники – это совокупность свойств, обуславливающих их способность удовлетворять определённым требованиям в соответствии с назначением. Основные показатели качества регламентируются государственным стандартом. ГОСТ устанавливает

показатели их назначения, экономного использования энергии, технологичности, стандартизации и унификации, объёмно-массовые, стойкости к внешним воздействиям, надёжности.

Качество и надёжность полупроводниковых приборов и ИС закладываются при их проектировании, обеспечиваются в процессе изготовления и поддерживаются при эксплуатации. Качество и надёжность зависят, прежде всего, от конструкции изделий, от сложности технологических процессов и стабильности технологических процессов и стабильности их режимов. При этом определяющим является выбор технологии.

Одним из методов оценки качества полупроводниковых приборов и ИС на этапах их производства и эксплуатации является оценка единым комплексным показателем, называемым коэффициентом качества. За высшую оценку условно принимают коэффициент качества, равный единице. Коэффициент качества определяют с учётом процента сдачи продуктов с первого предъявления, претензий потребителя, процента брака, состояния технологической дисциплины и других показателей.

ГОСТы представляют собой документы, определяющие нормы, правила, методы производства, свойства конкретной продукции и т.д. и предназначены для применения в разных сферах народного хозяйства.

Способы и методы проверки различных параметров полупроводниковых приборов и ИС

определяются ГОСТами системы контроля качества изделий электронной техники. Оценивают качество полупроводниковых приборов и ИС, сравнивая результаты их испытаний с требованиями стандарта.

Испытания обычно регулярно повторяют и проводят в лабораторных или эксплуатационных условиях. В промышленности испытания проводят в лабораторных условиях, имитируя различные воздействующие факторы с помощью специальных испытательных стендов.

Для контроля качества полупроводниковых приборов и ИС проводят квалификационные, приёмо-сдаточные, периодические, типовые и контрольно-выборочные испытания.

По характеру воздействий испытания подразделяются на конструктивные, электрические, механические и климатические.

Контрольные вопросы

1. Что называют качеством изделий и какими показателями оно характеризуется?
2. Каковы основные направления интенсификации производства?
3. В чём заключается автоматизация производственных процессов?
4. Каково назначение роботов в современных производствах ИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сугано Т., Икома Т., Такзиси Ё. Введение в микроэлектронику: Пер. с яп. - М.: Мир, 1988. - 320 с., ил.
2. Никифорова – Денисова С.Н., Механическая и химическая обработка, Учебное пособие, - М.: Высш. Шк., Высш. Шк., 1989. - 95 с.
3. Никифорова – Денисова С.Н., Любушкин Е.Н., Термические процессы. Учебное пособие, - М.: Высш. Шк., Высш. Шк., 1989. - 96 с.
4. Моряков О.С., Сборка, Учебное пособие, - М.: Высш. Шк., Высш. Шк., 1990. - 126 с.
5. Степаненко И.П., Основы микроэлектроники, Учебное пособие, М., ЛБЗ, 2001, 488 с.
6. Козырь И.Я., Горбунов Ю.И., Чернозубов Ю.С., Пономарёв А.С., Общая технология, М.: Высш. Шк., 1989. - 223 с.