

Конструкторско-технологическое обеспечение

производства ЭВМ

История развития микроэлектроники

Интенсивное развитие современной науки и техники невозможно представить без электроники и одной из ведущих ее областей - микроэлектроники. Изделия электроники и микроэлектроники широко применяются в вычислительной технике радиолокации, технике связи, промышленности и сельском хозяйстве, медицине и бытовых приборах. Элементной базой современной электронной аппаратуры являются полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы (ИС), изготовление которых за сравнительно короткое время стало самостоятельными производствами.

Электроника - это прежде всего наука о процессах, происходящих с электронами в вакууме, газах, жидкостях и твердых телах. Вместе с тем электроника - это и область техники, в которой взаимодействия электронов с электромагнитными полями используются для преобразования электромагнитной энергии, создания электронных приборов, а также устройств передачи, обработки и хранения информации. Электроника исследует эти взаимодействия как в макро-объемах - рабочем пространстве электронных приборов, так и в микрообъемах - атомах, молекулах или кристаллической решетке.

Принято считать электронику наукой XX века. Однако ее корни уходят в середину XIX века, когда разрабатывалась термодинамика - наука, изучающая законы преобразования энергии. Вслед за этим был открыт ряд эффектов, которые легли в основу создания фотоэлементов, детекторов, диодов, транзисторов и других электронных приборов. К таким эффектам относятся изменение сопротивления столбика селена под воздействием света, возникновение электродвижущей силы на его концах при освещении, односторонняя проводимость заостренной металлической проволоочки при ее контакте с сульфидами некоторых металлов и, наконец, термоэлектронная эмиссия, открытия Т.А. Эдисоном в 1883 г.

Развитие электроники можно разделить на пять этапов.

Первый этап начался в конце XIX столетия, после того как на заседании Русского физико-химического общества 7 мая 1895 г. А.С. Попов продемонстрировал прибор, по существу явившийся первым в мире радиоприемником. Этот день можно считать не только днем рождения радио, но и электроники. Устройства, которые начали применять в это время, были предназначены для передачи и приема электрических сигналов и состояли из сопротивлений (резисторов), конденсаторов, катушек индуктивности и других пассивных элементов.

Второй этап, часто называемый “эрой электронных ламп”, наступил в начале XX в. после изобретения в 1904 г. Дж. Флемингом вакуумного диода, а в 1906 г. Л. Форестом - триода, которые были первыми активными элементами, позволяющими преобразовывать и усиливать электрические сигналы.

В эти же годы русский физик А.Г. Столетов провел исследования, которые легли в основу создания фотоэлектронных умножителей, телевизионных трубок и др. В 1907 г. сотрудник технологического института Санкт-Петербургского университета Б.Л. Розинг разработал телевизионную систему. Эта работа была продолжена одним из его учеников В.К. Зворыкиным в США, где в 1923 г. он изобрел передающую трубку — иконоскоп, а год спустя — кинескоп. В 1918 -

1925 гг. в Нижегородской лаборатории - первом радиотехническом научно - исследовательском центре нашей страны плодотворно работал М.А. Бонч-Бруевич, который в 1919 г. опубликовал основы теории и расчета радиоламп. В 1921 г. совместно с сотрудниками им были разработаны мощные генераторные лампы для радиопередатчиков, используемых в системах дальней радиосвязи и радиовещания.

С этого времени электронные лампы становятся основной элементной базой. На них создаются генераторы, передатчики, усилители, выпрямители, радиоприемники и, наконец, в середине 40-х годов - первые электронные вычислительные машины (ЭВМ). Функциональное усложнение электронных устройств привело к применению большого количества элементов (ламп, резисторов, конденсаторов и др.), резко увеличило их массу и габариты и снизило надежность. Так, в отечественных ЭВМ “Урал” насчитывалось около 1000 электронных ламп, каждая из которых выходила из строя примерно через 50 ч. Вычислительные машины типа БЭСМ содержали по 5- 6 тыс, ламп, и количество их предполагалось довести до 10 тыс., что сокращало время безотказной работы ЭВМ до 5 ч.

Ограниченные возможности электронных ламп, необходимость улучшения функциональных характеристик различных электронных устройств, снижения их массы и габаритов, а также повышения надежности в жестких условиях эксплуатации потребовали разработки новых материалов, совершенствования технологии и привели к созданию принципиально новых элементов.

Третий этап развития электроники начался в 1948 г. с изобретением В. Шокли, Д. Бардином и У. Браттейном транзистора - полупроводникового прибора, предназначенного для усиления, генерирования и преобразования электрических колебаний различных частот и ставшего основой радиоэлектронной аппаратуры.

Следует отметить, что возникновению и развитию полупроводниковой электроники во многом способствовали работы русских и советских ученых. Еще в 1874 г. А.С. Поповым были обнаружены выпрямительные свойства контактов между металлами и их сернистыми соединениями, обладающими полупроводниковыми свойствами. В 20-е годы советский радиофизик О.В. Лосев сконструировал и изучил кристаллические полупроводниковые детекторы и экспериментально доказал существование в детектирующем контакте слоя, обладающего вентильными свойствами, т.е. наличие *p-n* перехода. В 1922 г. он открыл усилительные свойства детектора и первый в мире создал полупроводниковый высокочувствительный радиоприемник-кристадин. В дальнейшем Б.И. Давыдовым была предложена теория процессов, происходящих в области контакта полупроводника с металлом, объясняющая выпрямляющие свойства полупроводников.

Систематическое изучение свойств полупроводников началось в нашей стране еще в 30-е годы. Под руководством академика А.Ф. Иоффе с 1928 г. в Ленинградском физико-техническом институте группой советских ученых исследовались полупроводники и были разработаны на их основе термо- и фото-электрические приборы.

Малые размеры и большая надежность полупроводниковых приборов, низкая потребляемая мощность и высокий КПД обусловили их широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре и электронно-вычислительных устройствах.

Разработка и развитие в 1954 - 1959 гг. диффузионной технологии, оксидного маскирования и фотолитографии позволили в значительной степени усовершенствовать транзисторы, улучшить их параметры. Наряду со снижением

стоимости в первые годы производства транзисторов их надежность в среднем повышалась в 10 раз каждые четыре года и за 20 лет возросла в 100 тыс. раз.

Появление малогабаритных активных элементов потребовало создания аналогичных пассивных. Так, размеры резисторов и конденсаторов уменьшились в 50 - 70 раз. Вместе с тем характерной чертой радиоэлектронной аппаратуры, создаваемой на основе малогабаритных элементов и приборов, является сложность сборки устройств и систем, состоящих из нескольких тысяч электрорадиоэлементов. Так, ЭВМ, разработанные в конце 50-х годов, содержали около 100 тыс. диодов и 25 тыс. транзисторов. Поэтому для повышения надежности радиоэлектронных устройств необходимо было обеспечить качество сборочно-монтажных работ.

Четвертый этап развития электроники - разработка и производство в 1958 - 1960 гг. интегральных микросхем - связан с планарной и пленочной технологиями, позволившими значительно уменьшить размеры элементов с десятков микрометров до единиц микрометра и решить проблему надежности межэлементных соединений. В этот период развивается микроэлектроника - область электроники, занимающаяся исследованием, конструированием, изготовлением и применением электронных функциональных устройств микроминиатюрного интегрального исполнения.

Микроминиатюризация - это не только уменьшение объема и массы изделий, но и создание таких устройств, принципы действия которых основаны на новых физических явлениях. Интеграция предусматривает объединение как определенного количества элементов в заданном объеме (не менее пяти в 1 см^3), так и новых технологических методов формирования этих элементов и микросхемы в целом.

Интегральные микросхемы в настоящее время являются основой радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры.

Пятый этап характеризуется разработкой устройств функциональной электроники. Если в интегральных микросхемах объединяется большое количество элементов, то в функциональных интегрируются магнитные, оптические, термоэлектрические и другие объемные и поверхностные физические эффекты. В функциональных микросхемах трудно или невозможно выделить отдельные элементы, эквивалентные традиционным (транзисторам, диодам, конденсаторам, катушкам индуктивности).

Функциональная микроэлектроника - перспективное направление развития электроники. Несмотря на то, что различные диоды, транзисторы, а также ИС и устройства функциональной электроники отличаются по конструктивным и функциональным признакам, все технологические процессы их изготовления основаны на чередовании ряда однотипных операций. Такими операциями являются: ориентация и резка слитков полупроводниковых материалов на пластины; механическая и химическая обработка пластин; создание на их поверхности слоев диоксида или нитрида кремния; эпитаксиальное наращивание слоев полупроводниковых материалов (кремния, германия, арсенида или фосфида галлия и др.); диффузия и ионная имплантация; осаждение тонких металлических пленок; литографическая обработка; сборка, герметизация, контроль, испытания, маркировка и упаковка готовых изделий.

Описанию конструкций и основных технологических процессов изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем посвящен настоящий раздел курса.

Технология изготовления интегральных схем.

Интегральная микросхема (ИС) – это микроэлектронное изделие, выполняющая функции преобразования и обработки сигналов, которое характеризуется плотной упаковкой элементов так, чтобы все связи и соединения между элементами представляли единое целое.

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 ИМС, выполняющие функции усиления или другого преобразования сигналов (диоды, транзисторы и др.), а *пассивными* – элементы, реализующие линейную передаточную функцию (резисторы, конденсаторы, индуктивности).

Классификация интегральных микросхем :

1. По способу изготовления:

а) Пленочные: - тонкопленочные (толщина $< 10^{-6}$ м). - толстопленочные (толщина $> 10^{-6}$ м).	б) гибридные: - тонкопленочные. - толстопленочные.	в) совмещенные	г) полупроводниковые: - монокристалльные. - многокристалльные. - на сапфировой подложке.
---	---	-----------------------	--

2. По степени интеграции.

Степень интеграции ИС является показателем сложности, характеризуемым числом содержащихся в ней элементов и компонентов. Степень интеграции определяется формулой $k = \lg(N)$, где k – коэффициент, определяющий степень интеграции, округляемый до ближайшего большего целого числа, а N – число элементов и компонентов, входящих в ИС.

Для количественной характеристики степени интеграции часто используют такие термины: если $k \leq 1$, ИС называют простой ИС, если $1 < k \leq 2$ – средней ИС (СИС), если $2 < k \leq 4$ – большой ИС (БИС), если $k \geq 4$ – сверхбольшой ИС (СБИС).

Кроме степени интеграции используют еще такой показатель, как *плотность упаковки* элементов – количество элементов (чаще всего транзисторов) на единицу площади кристалла. Этот показатель характеризует главным образом уровень технологии, в настоящее время он составляет более 1000 элементов/мм².

Пленочные интегральные схемы – это интегральные схемы, элементы которых нанесены на поверхность диэлектрического основания в виде пленки. Их особенность – в чистом виде не существуют. Служат только для изготовления пассивных элементов – резисторов, конденсаторов, проводников, индуктивностей.

Гибридные ИС – это тонкопленочные микросхемы, состоящие из пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, контактных площадок) и дискретных активных элементов (диодов, транзисторов). Гибридная ИС, показанная на рис. 1, представляет собой диэлектрическую подложку с нанесенными на нее пленочными конденсаторами и резисторами и присоединенным навесным транзистором, база которого соединена с верхней обкладкой конденсатора шиной в виде очень тонкой проволоочки.

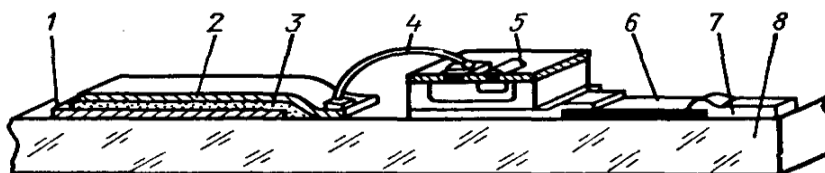


Рис. 1. Структура пленочной гибридной ИС:

1, 2 - нижний и верхний обкладки конденсатора, 3 - слой диэлектрика, 4 - проволочная соединительная шина, 5 - навесной транзистор, 6 - пленочный резистор, 7 - контактный вывод, 8 - диэлектрическая подложка

В полупроводниковых ИС все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и на поверхности кристалла полупроводника. Полупроводниковые ИС представляют собой плоский кристалл полупроводника (подложка), в поверхностном слое которого различными технологическими приемами сформированы эквивалентные элементам электрической схемы локальные области (диоды, транзисторы, конденсаторы, резисторы и др.), объединенные по поверхности пленочными металлическими соединениями (межсоединениями).

В качестве подложек полупроводниковых ИС служат круглые пластины кремния, германия или арсенида галлия, имеющие диаметр 60 - 150 мм и толщину 0,2 - 0,4 мм.

Полупроводниковая подложка является групповой заготовкой (рис. 2), на которой одновременно изготавливают большое количество ИС.

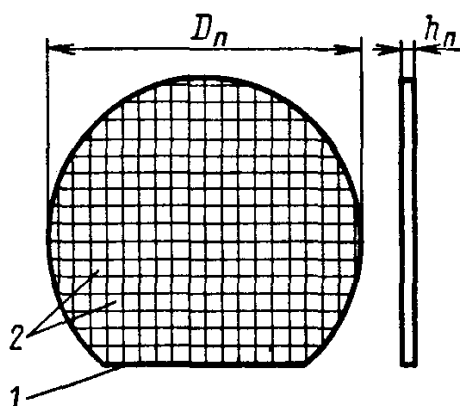


Рис. 2. Групповая кремниевая пластина:

1 — базовый срез,
2 — отдельные кристаллы (чипы)

После завершения основных технологических операций ее разрезают на части — кристаллы 2, называемые также **чипами**. Размеры сторон кристаллов могут быть от 3 до 10 мм. Базовый срез 1 пластины служит для ее ориентации при различных технологических процессах.

Структуры элементов **полупроводниковой ИС** - транзистора, диода, резистора и конденсатора, изготавливаемых соответствующим легированием локальных участков полупроводника методами планарной технологии, показаны на рис. 3, а—г. Планарная технология характеризуется тем, что все выводы элементов ИС располагаются в одной плоскости на поверхности и одновременно соединяются в электрическую схему тонкопленочными межсоединениями. При планарной технологии проводится групповая обработка, т. е. в течение одного технологического процесса на подложках получают большое количество ИС, что обеспечивает высокие технологичность и экономичность, а также позволяет автоматизировать производство.

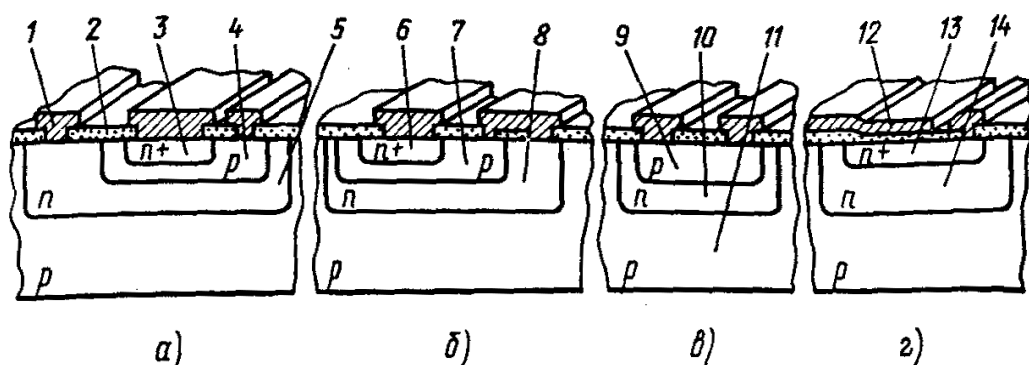


Рис. 3. Структуры элементов полупроводниковой ИС:

а - транзистора, *б* - диода, *в* - резистора, *г* - конденсатора, 1 - тонкопленочный контакт, 2 - слой диэлектрика, 3 - эмиттер; 4 - база, 5 - коллектор, 6 - катод, 7 - анод, 8 - изолирующий слой; 9 - резистивный слой, 10 - изолирующий слой, 11 - пластина, 12, 14 - верхний и нижний электроды конденсатора, 13 - слой диэлектрика

В совмещенных ИС (рис. 4), являющихся вариантом полупроводниковых, на кремниевой подложке создают полупроводниковые и тонкопленочные элементы. достоинство этих схем состоит в том, что в твердом теле технологически трудно изготовлять резисторы заданного сопротивления, так как оно зависит не только от толщины легированного слоя полупроводника, но и от распределения удельного сопротивления по толщине. Доводка сопротивления до номинального значения после изготовления резистора также представляет значительные трудности. Полупроводниковые резисторы обладают заметной температурной зависимостью, что осложняет разработку ИС.

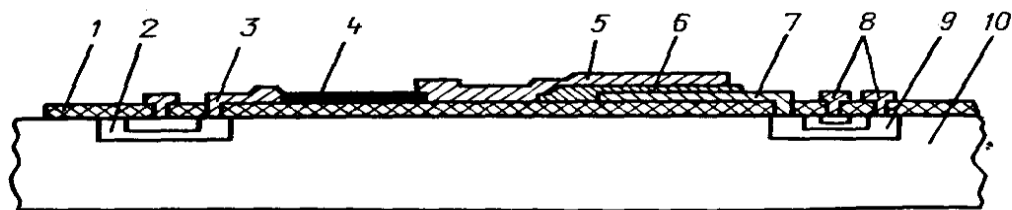


Рис. 4. Структура совмещенной ИС:

1 - пленка диоксида кремния, 2 - диод, 3 - пленочные внутрисхемные соединения, 4 - тонкопленочный резистор, 5, 6, 7 - верхний и нижний электроды тонкопленочного конденсатора и диэлектрик, 8 - тонкопленочные контакты, 9 - транзистор, 10 - кремниевая пластина.

Кроме того, в твердом теле также весьма трудно создавать конденсаторы. Для расширения номинальных значений сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов полупроводниковых ИС, а также улучшения их рабочих характеристик разработана основанная на технологии тонких пленок комбинированная технология, называемая *технологией совмещенных схем*. В этом случае активные элементы ИС (можно и некоторые не критичные по номинальному сопротивлению резисторы) изготавливают в теле кремниевого кристалла диффузионным методом, а затем вакуумным нанесением пленок (как в пленочных ИС) формируют пассивные элементы - резисторы, конденсаторы и межсоединения.

Такая технология позволяет получать большие абсолютные значения сопротивлений резисторов и конденсаторов с малыми паразитными связями и

низкими допусками, что увеличивает быстродействие и улучшает рабочие характеристики ИС.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИС

Монокристаллические слитки полупроводникового материала (германия, кремния, арсенида галлия и др.), необходимые для изготовления полупроводниковых приборов и ИС, имеют форму цилиндров диаметром от 12 до 150 мм и более. Из слитков резкой получают пластины, толщина которых составляет доли миллиметра.

После выполнения в определенной последовательности соответствующих технологических операций пластины разрезают на кристаллы площадью от десятых долей квадратного миллиметра до нескольких квадратных сантиметров. Затем кристаллы заключают в корпуса и, сделав необходимые электрические соединения (пайкой, сваркой), получают полупроводниковые приборы и ИС.

Создание полупроводниковых приборов и ИС - достаточно сложный технологический процесс, состоящий из сотен операций; среди них можно выделить основные, повторение которых составляет технологический цикл.

ОРИЕНТАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛИТКОВ

Монокристаллические слитки полупроводников имеют строго упорядоченное, регулярно повторяющееся расположение атомов в пространстве, создающее определенную *кристаллическую решетку*. Расположение атомов обычно изображают в виде так называемой элементарной кристаллической ячейки (рис. 5), обозначая межатомные расстояния буквой a . Места расположения атомов в кристаллической решетке называют *узлами*.

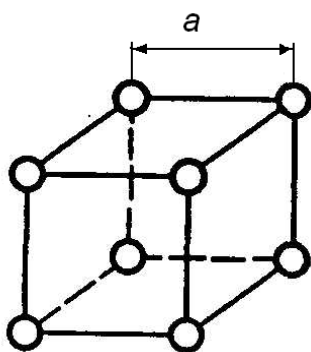


Рис. 5. Элементарная кристаллическая ячейка простой кубической решетки

Известно, что жидкости и аморфные тела изотропны, т.е. обладают одинаковыми свойствами во всех направлениях (электрическим сопротивлением, теплопроводностью и т.д.).

Кристаллические тела анизотропны, т.е. их свойства зависят от направлений воздействия и измерения. В этом случае межатомные расстояния определяют характер и значение энергетического взаимодействия атомов, прочность их сцепления, а, следовательно, способность противостоять (или способствовать) электрическому, оптическому, химическому и другим внешним воздействиям.

Ориентацию направлений и плоскостей в кристаллической решетке обозначают индексами Миллера, которые для кристаллов с кубической решеткой показаны на рис. 6, а-в. Для этого из одного узла решетки (точки 0) проводят три кристаллографические оси OX , OY , OZ , параллельные ребрам ячейки. Целые числа, соответствующие отрезкам, отсекаемым плоскостью от кристаллографических осей, являются индексами данных кристаллографических плоскости и направления. Для обозначения плоскостей используют круглые

скобки, например (111), (110), (100), а для обозначения направлений - квадратные, например [111], [110], [100]. Необходимо отметить, что количество атомов, расстояния между ними и плотность их упаковки в каждой плоскости неодинаковы.

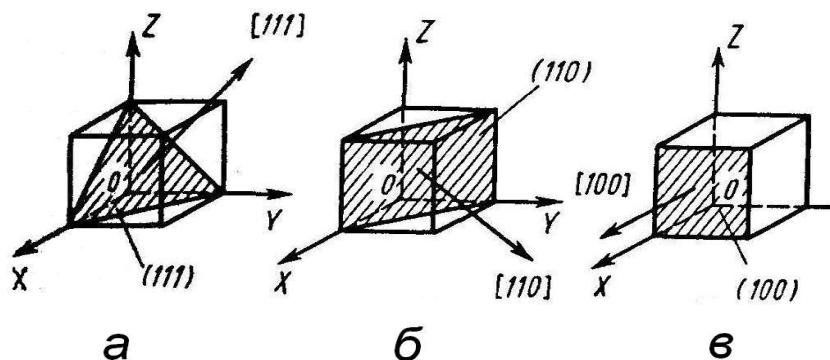


Рис. 6. Условные обозначения кристаллографических плоскостей и направлений в кристалле с кубической решеткой (а-в)

Монокристаллы полупроводников, как правило, выращивают в соответствии с определенным кристаллографическим индексом, обычно [111] (его ось совпадает с продольной осью слитка, а плоскость (111) перпендикулярна ей). Однако точность заданной ориентации обычно невелика, так как зависит от многих технологических факторов. Поэтому для получения пластин с точно заданной плоскостью ориентации слиток перед резкой дополнительно ориентируют, т.е. определяют отклонение его оси от заданной кристаллографической оси. Слиток, ориентированный в плоскости (111), можно разрезать на пластины с любой другой плоскостью ориентации, если учесть угол наклона каждой из них по отношению к плоскости (111).

Оrientируют слитки перед резкой на пластины рентгеновским или оптическим методом.

Рентгеновский метод ориентации основан на особенности рассеяния рентгеновских лучей атомами кристаллической решетки: угол падения пучка параллельных мономатических рентгеновских лучей равен углу отражения их от любой кристаллографической плоскости (условие Вульфа - Брегга).

Интенсивность отраженных рентгеновских лучей зависит от плотности упаковки данной плоскости атомами и чем она больше, тем интенсивнее отражение. Поскольку плоскость (111) наиболее плотно упакована атомами, ей соответствует и большая интенсивность отраженных лучей.

Оптический метод ориентации состоит в следующем. Торцы слитка полупроводника полируют, затем обрабатывают в селективном травителе. Вследствие различных скоростей травления в разных кристаллографических направлениях на его поверхности появляются фигуры травления (рис. 7, а-в), которые можно наблюдать на специальных оптических установках. В зависимости от степени отклонения кристаллографической плоскости от плоскости торца фигура будет находиться дальше от центра экрана или ближе к нему.

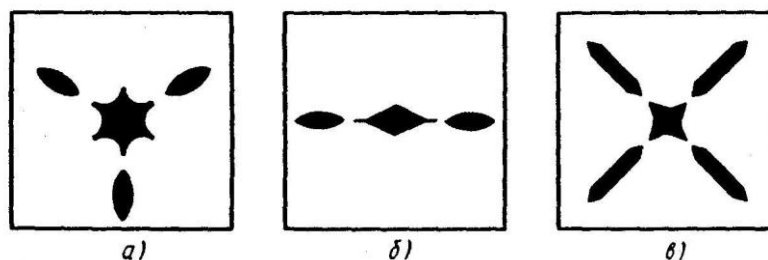


Рис. 7 Фигуры, получаемые при отражении светового пучка от кристаллографических плоскостей: а - (111), б - (110), в - (100)

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛИТКОВ И ПЛАСТИН

Резка. Полупроводниковые материалы обладают высокой твердостью и хрупкостью, поэтому при резке слитков и пластин не используют традиционные применяемые при металлообработке методы. Кроме того, большое значение имеет выбор рациональных методов резки, предусматривающих минимальные отходы дорогостоящего полупроводникового материала, так как его потери являются одним из основных факторов, определяющих стоимость готовых приборов и интегральных микросхем.

В производстве полупроводниковых приборов и ИС резку осуществляют дважды: слитки режут на пластины и пластины - на кристаллы. Наибольшее распространение получили следующие способы резки:

- дисками с наружной алмазной режущей кромкой (слитков и пластин);
- дисками с внутренней алмазной режущей кромкой (слитков на пластины);
- полотнами и проволокой с применением абразива (слитков и пластин);
- скрайбирование - нанесение рисок на пластины с последующим разламыванием их на кристаллы.

Резка диском с наружной режущей кромкой является наиболее простым и легко осуществимым в производственных условиях способом разделения слитков и пластин. Алмазная кромка диска обладает высокой режущей способностью, так как алмазные зерна размером 20 - 60 мкм, закрепленные на металлической основе диска, представляют собой микрорезцы, снимающие мельчайшие стружки с обрабатываемой поверхности. При частоте вращения до 10000 об/мин диска с большим количеством алмазных зерен (микрорезцов) производительность обработки высока. Так как при резке из-за трения выделяется значительное количество теплоты, на алмазный диск необходимо непрерывно подавать охлаждающую жидкость. Для получения нескольких параллельных с достаточно высокой точностью прорезей, а также повышения производительности резки применяют установки, на шпиндель которых устанавливают несколько дисков.

При использовании дисков большого диаметра возникает проблема их стойкости, связанная с недостаточной жесткостью. Для уменьшения потерь полупроводникового материала необходимы тонкие диски. Однако под действием сил резания и вибрации неоптимальное соотношение между толщиной и диаметром дисков (1:300 и более) приводит к их деформации (изгибу), увеличению ширины реза, уменьшению точности обработки, образованию дефектов (сколов, трещин и др.). Обычно резку полупроводниковых слитков выполняют дисками диаметром 80 - 125 мм и толщиной 0,3 - 0,7 мм. При этом минимальная ширина прорези составляет 0,45 мм.

Диски с наружной режущей кромкой наиболее часто используют для разделения пластин на кристаллы. В этом случае глубина прорези составляет 0,5 - 1 мм. Так как диаметр диска при этом относительно невелик, его толщина может быть около 0,1 мм, что обеспечивает ширину прорези 0,15 мм.

Резку полупроводниковых пластин на кристаллы выполняют также металлическими дисками с подачей в зону резания абразивной суспензии, состоящей из порошков карбида бора B_4C , карбида кремния SiC или электрокорунда Al_2O_3 и воды, взятых в соотношения 1:3 или 1:4. При вращения диск захватывает суспензию, которая, ускоряясь, с силой ударяет в разрезаемую пластину, в результате чего от нее откалываются микрочастицы. В процессе резания частицы абразива, поступающие в зазор между металлическим диском и полупроводниковым материалом, постоянно обновляются. Кроме того, при такой резке не требуется специального охлаждения, так как абразивная суспензия достаточно хорошо отводит образующуюся теплоту. В процессе резки изнашивается не только абразивный порошок, но и диски, которые приходится заменять через 12 - 16 ч.

Резка диском с внутренней алмазной режущей кромкой используется для разделения слитков на пластины. Режущим инструментом является слой алмазов, нанесенный на внутреннюю кромку диска из бронзовой или стальной (1Х18Н9Т) фольги толщиной 0,1 - 0,15 мм. Высокая производительность в сочетании с хорошим качеством и небольшой шириной реза (около 0,25 - 0,3 мм), а следовательно, и меньшие (почти на 60%) потери полупроводникового материала выгодно отличают этот способ резки от рассмотренных. Особенность крепления диска обеспечивает его высокую жесткость, значительно снижает вибрацию и позволяет получать поверхность пластин без глубоких царапин и сколов.

Резка полотнами, совершающими возвратно-поступательное движение, является одним из наиболее старых способов. Одновременное использование до 100 полотен (из стали марок 70С2ХА, У8А или У10А) толщиной 0,1 - 0,2 мм, закрепленных с фиксированным зазором, позволяет достаточно качественно и производительно разрезать как слитки, так и пластины. Суспензия, подаваемая со скоростью 1,5 - 2 л/мин, работает как режущий инструмент и позволяет разрезать, например, на пластины слитки кремния диаметром 30-40 мм за 4 - 8 ч, а германия - за 2 - 5 ч.

Для увеличения производительности применяют полотна с алмазной режущей кромкой (штрипсы). При толщине полотен из пермаллоя 0,05 - 0,1 мм и ширине алмазного режущего слоя 1,5 - 2 мм возможна резка как слитков, так и пластин. Однако по качеству пластины, отрезаемые штрипсами, уступают пластинам, отрезаемым дисками с применением абразивных суспензий.

Резка проволокой диаметром 0,11 - 0,15 мм из вольфрама или сплава МВ-50 (50% W, 50% Mo) не отличается от резки полотнами и ее достоинствами являются большая скорость (100—200 м/с) и низкие отходы материала вследствие малой ширины прорези. Недостаток этого способа - уход проволоки в сторону при резке на большую глубину и длительная наладка оборудования в случае обрыва проволоки.

Скрайбирование алмазными резцами применяют для разделения пластин на кристаллы квадратной или прямоугольной формы. При этом способе на поверхность полупроводниковых пластин скрайбером (алмазным резцом) наносят риски шириной 20 - 40 мкм и глубиной 7 - 15 мкм в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 8). Возникающие и концентрирующиеся под рисками механические напряжения локально снижают механическую

прочность пластин, поэтому достаточно приложить слабое изгибающее усилие вдоль рисок, чтобы произошло разламывание пластин на кристаллы.

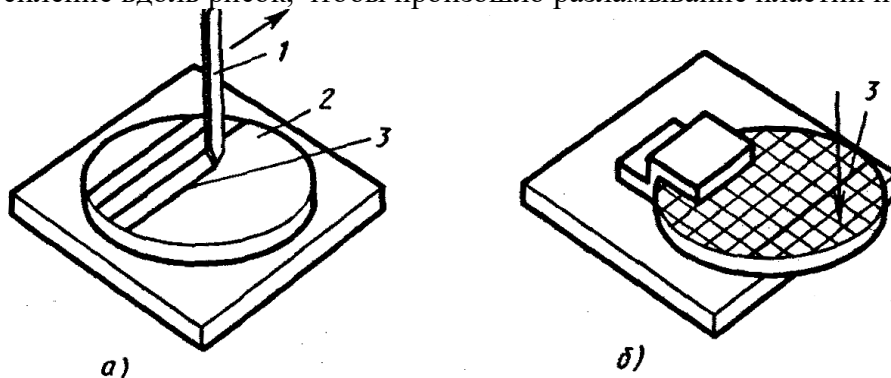


Рис. 8. Скрайбирование пластины (а) и разламывание ее на кристаллы (б): 1 - резец, 2 - полупроводниковая пластина, 3 - риски

Основное достоинство этого метода - отсутствие пропила и отходов полупроводникового материала. Отсутствие сколов и непрерывность скрайбирования в значительной степени зависят от материала пластин, их толщины, степени износа резца и приложенной к нему силы. Так, при толщине германиевых и кремниевых пластин 200 мкм нагрузка соответственно составляет 0,2 - 0,4 и 0,4 - 0,6 Н, а при их толщине 300 - 400 мкм равна 0,4 - 0,6 и 0,8 - 1,2 Н. Качество скрайбирования значительно зависит от кристаллографической ориентации пластин. Так, наиболее жесткие допуски на размеры кристаллов обеспечиваются при разделении пластик, ориентированных в плоскости (110). Минимальный шаг резки кремниевых и германиевых пластин соответственно равен 500 и 400 мкм.

Скрайбирование лучом лазера в настоящее время находит все большее применение. При достаточно высокой мощности (до 10^8 Вт), острой фокусировке (10^{-5} - 10^{-6} см²) и малом времени воздействия (до 10^{-9} с) лазерного луча вследствие больших перепадов температуры в пластинах образуются локальные напряжения и, кроме того, частично испаряется материал с образованием канавки. При большей мощности луча или длительности импульса возможна сквозная резка пластин.

Достоинствами этого способа являются небольшое количество микротрещин и сколов малых размеров, получение глубокой канавки и высокая скорость обработки, а недостатками - разбрызгивание материала, что требует специальных защитных покрытий для пластин, и высокая стоимость оборудования.

Шлифовка и полировка. Эти операции, выполняемые после резки, позволяют обеспечить плоскопараллельность сторон пластин, соответствие их геометрических размеров заданным и минимальную шероховатость поверхности. Кроме того, при шлифовке и полировке с пластин частично удаляется нарушенный в процессе резки приповерхностный слой.

Шлифовку выполняют на специальных станках в несколько стадий. Наиболее широко применяют два вида шлифовки: свободным абразивом и алмазными кругами.

При шлифовке свободным абразивом используют круги (шлифовальники) из чугуна, стекла, бронзы и др. Абразивом служат суспензии или пасты на основе микропорошков Al_2O_3 , SiC, B_4C , или синтетического алмаза зернистостью от 2,8 до 3 мкм. Частичное разрушение обрабатываемой поверхности происходит за счет перекатывания частиц абразива между

поверхностями пластин и шлифовальника. В результате многократного воздействия поверхность пластин покрывается трещинами, сколами, царапинами, глубина которых в основном зависит от размера зерен абразива.

При шлифовке алмазными кругами материал с поверхности пластин удаляется вследствие царапания и срезания острыми гранями зерен абразива.

В процессе обработки сошлифовывается слой толщиной 60 - 100 мкм. Для устранения больших микронеровностей и неравномерности пластин по толщине выполняют как одностороннюю, так и двустороннюю шлифовку. Разброс пластин по толщине не должен превышать 1 мкм, а по плоскопараллельности - 0,5 мкм.

Полировка обеспечивает минимальные микронеровности поверхности и наименьшую толщину нарушенного слоя. Механическая полировка в основном происходит в результате микрорезания, пластических деформаций и сглаживания микронеровностей. Полировка бывает предварительной и окончательной (тонкой). При предварительной полировке используют алмазные пасты и суспензии на основе абразивных порошков с размером зерен 1 - 3 мкм. Окончательную полировку выполняют субмикронными (менее 1 мкм) алмазными порошками и пастами или мягкими полирующими составами на основе оксидов алюминия, хрома, циркония, кремния и др.

Производят полировку на полировальниках, обтянутых замшей, сукном, фетром и др. При окончательной полировке кремния используют полировальные суспензии на основе оксидов циркония и кремния с добавлением растворов КОН и NaOH. Щелочи растворяют образовавшиеся на поверхности оксиды и тем самым снижают твердость поверхностного слоя, что способствует более производительному удалению его зернами абразива. Однако независимо от того, насколько тщательно проводилась полировка, микротрещины и некоторая деформация поверхности остаются. Так, глубина поврежденного слоя механически полированных германия и кремния соответственно составляет 1,5 и 0,7 - 1,0 мкм.

Полировка также может быть односторонней и двусторонней.

Сразу после полировки, прежде чем приступить к дальнейшим операциям жидкостной и сухой обработки, полупроводниковые пластины тщательно отмывают от шлифовальных порошков и загрязнений органического происхождения в мыльных растворах, горячей деионизированной воде, толуоле, а затем сушат на центрифугах в потоке сухого теплого воздуха. В ином случае загрязнения вызывают коррозию полированной поверхности пластин.

ЖИДКОСТНАЯ И СУХАЯ ОБРАБОТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

Электрофизические параметры и надежность полупроводниковых приборов и ИС во многом зависят от степени совершенства поверхности пластин и отсутствия на них каких-либо загрязнений.

Нарушенный приповерхностный слой, образующийся вследствие механической обработки, можно окончательно удалить лишь на операциях жидкостной и сухой (газовой) обработки пластин.

Так как идеально чистой поверхности пластин не бывает, вводится понятие технологически чистой, т.е. поверхности, концентрация примесей на которой не препятствует воспроизводимому получению заданных значений параметров приборов и ИС и их стабильности. Обычно допустимая концентрация примесей не должна превышать 10^{-8} г/см².

Удаляют загрязнения жидкостными и сухими методами, которые подразделяются на физические и химические (рис. 9).

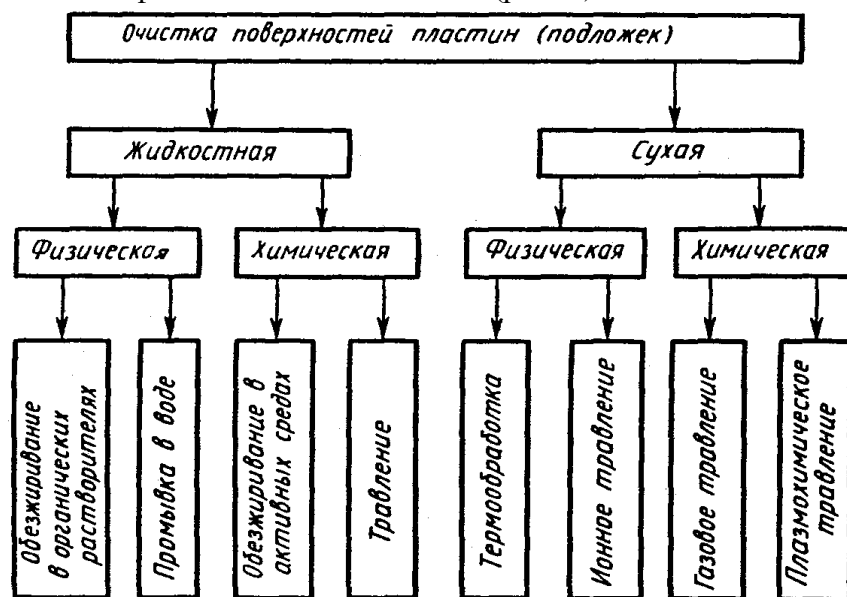


Рис. 9. Классификация методов очистки пластин (подложек)

Жидкостная обработка - это обезжиривание и травление пластин, а также обязательная их промывка после каждой операции в воде.

Обезжиривание в органических растворителях основано на удалении с поверхностей молекул жиров. При этом молекулы не разрушаются, а распределяются по всему объему ванны, заполненной четыреххлористым углеродом, бензолом, толуолом, изопропиловым спиртом. Такая очистка высокоэффективна, но многостадийна, требует большого расхода растворителей, дорогостояща и в большинстве случаев токсична.

Промывка предназначена для удаления остатков загрязнений, реагентов и продуктов реакций в специально очищенной (дистиллированной, бидистиллированной и деионизованной) воде.

Обезжиривание в активных средах основано на разрушении молекул жира растворителем, обычно горячим (75 - 80°C) перекисно-аммиачным раствором ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$). Выделяющийся в результате разложения перекиси водорода H_2O_2 атомарный кислород обладает высокой окислительной способностью по отношению к органическим (жиры, масла, силиконы) и неорганическим загрязнениям. Очистку поверхности пластин от растительных и животных жиров выполняют в мыльных растворах.

Химическое травление основано на растворении поверхности пластин соответствующими жидкими химическими реактивами (щелочами, кислотами и их солями) и состоит из нескольких этапов: диффузии реагента к поверхности и адсорбции его; поверхностных химических реакций; десорбция продуктов реакции и диффузии их от поверхности.

Травители, при обработке в которых самыми медленными стадиями, определяющими скорость процесса, являются диффузионные, называют *полирующими*.

Травители, при обработке в которых самой медленной стадией является химическая реакция, называют *селективными* (например, NaOH, KOH). 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.

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*.

Сухая обработка - это отжиг (термообработка), ионное, газовое и плазмохимическое травление.

При *термообработке* удаляют при высоких температурах адсорбированные поверхностью пластин загрязнения их разложением и испарением. Отжиг проводят в термических установках в среде инертного газа или в вакууме непосредственно перед операциями формирования полупроводниковых или пленочных структур.

Ионное травление - процесс удаления слоев материала вместе с загрязнениями бомбардировкой его поверхности потоком ионов инертных газов высокой энергии. Так, при травлении кремния энергия ионов достигает 1 - 10 кэВ. При бомбардировке поверхности пластин ионы передают атомам обрабатываемого материала дополнительные энергии и импульс. Если передаваемая атомам энергия превышает энергию их химических связей, а сообщаемые импульсы направлены наружу от поверхности, происходит смещение атомов, их отрыв от поверхности и распыление. Процесс выполняют в вакууме (в зависимости от метода давление аргона составляет 10^{-2} - 10^{-2} Па) при энергиях ионов, достаточных для распыления обрабатываемых материалов.

Эффективность удаления материала ионной бомбардировкой - коэффициент распыления S - определяется отношением количества испаряемых поверхностью атомов n_a к количеству бомбардирующих ионов n_i , т.е. $S = n_a / n_i$. Этот параметр является одним из основных для определения скорости травления, которая, в свою очередь, зависит от массы обрабатываемого материала m_a и состояния его поверхности k , энергии E_i и угла падения θ ионов, а также давления рабочего газа в камере.

В зависимости от способа генерации ионов и конструкции установки различают *ионно-плазменное* и *ионно-лучевое травление*.

При ионно-плазменном травлении держатель с пластинами, находящийся под отрицательным потенциалом, помещают в плазму газового разряда. Положительно заряженные ионы аргона устремляются к отрицательно заряженному держателю пластин, ускоряются электрическим полем и бомбардируют поверхность, очищая ее. В зависимости от напряжения на электродах, плотности ионного тока, давления инертного газа и продолжительности процесса скорость травления кремния, диэлектриков и металлов соответственно равна 0,2; 0,1 и 0,3 мкм/мин. Процесс безынерционен. Так обрабатывают строго локализованные участки поверхности.

При ионно-лучевом травлении пластины помещают на специальные мишени, расположенные вне зоны плазмы, и бомбардируют ионами, создаваемыми автономным (самоуправляемым) газоразрядным источником. Поток ионов фокусируется и управляется электрическим и магнитным полями. Положительные заряды, накапливаемые на обрабатываемой поверхности, компенсируются инжекцией электронов.

Ионное травление позволяет не только очищать поверхность любых подложек (полупроводниковых, диэлектрических и др.) от различных загрязнений, но и эффективно при их прецизионной локальной обработке.

При *газовом травлении* происходит химическое взаимодействие материала пластин с газообразными веществами и образующиеся при этом соединения улетучиваются. В качестве травителей используют смеси водорода или гелия с галогенами (фтором, хлором, бромом), галогеноводородами HBr , HCl , сероводородом H_2S и др. Молярное соотношение этих веществ в водороде или гелии составляет десятые доли - единицы процентов. Температура обработки 800 - 1300°C.

Газовое травление позволяет окончательно удалить нарушенный слой и обеспечивает получение более чистой поверхности, чем при жидкостной обработке. Однако необходимость использования особо чистых газов и высокие температуры процесса ограничивают его применение.

При *плазмохимическом травлении* молекулы активного газа распадаются в разряде на реакционноспособные частицы - электроны, ионы и свободные радикалы, химически взаимодействующие с поверхностью подложек. Так, поток электронов высокочастотной плазмы разлагает тетрафторид углерода CF_4 на ионы фтора F и радикалы CF^{+}_3 , CF^{+} , которые травят различные материалы (металлы, полимеры) с неодинаковой скоростью.

Скорость травления зависит также от температуры и газового состава плазмы. Например, введение в плазму инертного газа (аргона) химически активного газа (например, кислорода) изменяет скорость травления. Такое сочетание ионного и плазмохимического травления называют *ионно-химическим (реактивным) травлением*.

Сухая очистка пластин и локальная их обработка наиболее эффективны при создании БИС и СБИС.

При изготовлении полупроводниковых приборов и ИС, как правило, проводят комплексную очистку пластин, при которой удаляют практически все загрязнения. Так, обработка пластин кремния перед термическим окислением состоит из следующих операций:

- обезжиривания в перекисно-аммиачном растворе при 75 - 80°C и промывки проточной деионизованной водой;
- обработки в концентрированной азотной кислоте при 90 - 100°C и промывки проточной деионизованной водой;
- гидродинамической обработки беличьими кистями в струе деионизованной воды;
- травления в растворе фтористоводородной кислоты и промывки деионизованной проточной водой;
- ультразвуковой обработки в нескольких порциях перекисно-аммиачного раствора и промывки проточной деионизованной водой;
- сушки в центрифуге.

При изготовлении полупроводниковых приборов и ИС в большинстве случаев применяют жидкостную обработку. Сухую очистку проводят на специальных установках перед такой ответственной операцией, как, например, травление при литографической обработке, а также непосредственно перед напылением и эпитаксией.

ЭПИТАКСИАЛЬНОЕ НАРАЩИВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЕВ

Для создания полупроводниковых приборов и элементов ИС широко применяют метод эпитаксиального наращивания, или эпитаксию. Ориентированное наращивание слоев вещества с воспроизведением кристаллической структуры подложки называют эпитаксией. При этом

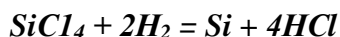
поступающие извне атомы осаждаемого вещества должны обладать достаточной энергией и способностью мигрировать по поверхности подложки, чтобы формирование кристаллической решетки происходило равномерно и по всей поверхности без образования дефектов. С повышением температуры подложек миграция атомов увеличивается. При низких температурах растущие слои получаются поликристаллическими.

В процессе роста эпитаксиальных слоев их легируют введением донорной или акцепторной примеси, что позволяет соответственно создавать слои *n*- или *p*-типа электропроводности. Если наращиваемые эпитаксиальные слои по химическому составу не отличаются (или незначительно отличаются) от вещества подложек и в результате получают гомогенные (от греч. *homogenes* - однородный) *p-n* переходы, такой процесс называют *гомоепитаксией* или *автоэпитаксией* (от греч. *autos* - само).

Процесс ориентированного наращивания эпитаксиальных слоев, существенно отличающихся по химическому составу от вещества подложек и не вступающих с ним в химическое взаимодействие, называют *гетероэпитаксией* (от греч. *heteros* - другой). При этом образуются гетерогенные (неоднородные) *p-n* переходы. Примером может служить эпитаксиальное наращивание слоя арсенида галлия на монокристаллическую подложку из кремния.

Ориентированное наращивание эпитаксиальных слоев, сопровождающееся их химическим взаимодействием с веществом подложек, называют *хемоепитаксией*. Образующийся при этом промежуточный слой отличается по химическому составу как от вещества подложки, так и от осаждаемого вещества, но имеет такую же кристаллическую структуру, как исходная подложка. Наиболее часто эпитаксиальные слои осаждают из газовой фазы (газофазная эпитаксия) или кристаллизацией из жидкой фазы (жидкофазная эпитаксия).

При *газофазной эпитаксии* используют различные химические реакции, происходящие в газовой (паровой) фазе при высокой температуре. При эпитаксии кремния широко применяют восстановление его тетрахлорида водородом:



Процесс эпитаксиального роста можно рассматривать как гетерогенную реакцию, состоящую из следующих стадий:

- переноса реагирующих веществ через газовую фазу к поверхности исходной подложки и их адсорбция;
- реакции или серии реакций на поверхности;
- присоединения атомов кремния, образующихся в результате реакций, к ступенькам роста на поверхности;
- десорбция, переноса газообразных продуктов реакции к основному потоку газа и удаления.

Процесс эпитаксиального наращивания выполняют на специальных установках (рис. 10), имеющих системы подачи, очистки и осушки газов (присутствие посторонних примесей и влаги в газах недопустимо). Основным элементом рабочей камеры **2** является кварцевая труба, в которую на подставке **5** с наклонной по отношению к потоку газов плоскостью, помещают монокристаллические подложки **4** из кремния и нагревают их с помощью индуктора **3** до 1200—1275°C.

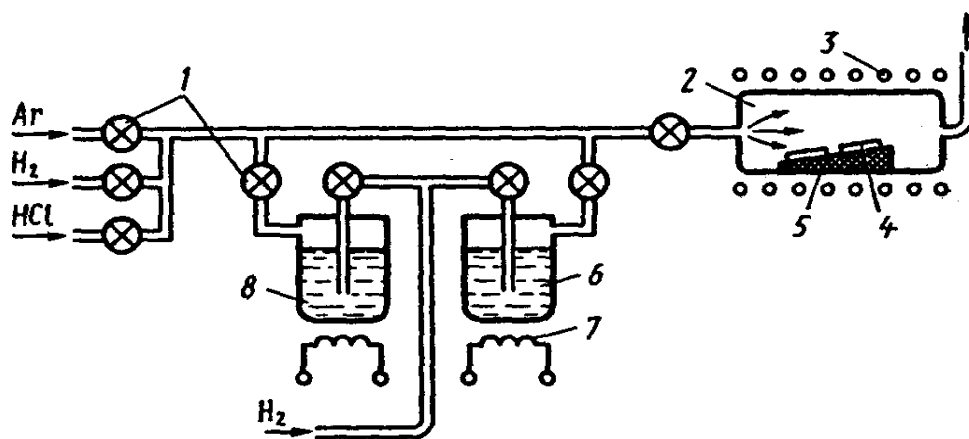
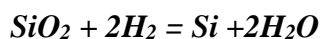
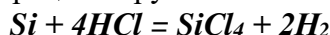


Рис. 10. Установка эпитаксиального наращивания:
1-вентили, 2-рабочая камера, 3-индуктор, 4-кремниевая подложка, 5-подставка, 6, 8-источники легирующей примеси и тетрахлорида кремния, 7-нагреватель

Предварительно камеру продувают аргоном, который вытесняет из системы воздух, так как при соединении его с водородом при нагревании образуется взрывоопасная смесь. Как и другие газы, аргон подают по отдельной магистрали, оснащенной вентилем, приборами для измерения давления (манометр) и расхода газа (ротаметр), а также клапаном с электромагнитным управлением. После продувки системы аргоном подложки обрабатывают 5 - 20 мин при 1200 - 1290°C в потоке водорода. При этом всегда имеющийся на их поверхности диоксид кремния восстанавливается до кремния по следующей реакции:

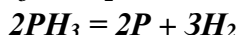
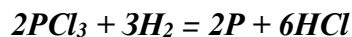


Затем в поток водорода добавляют 1 - 5% сухого хлористого водорода HCl и при той же температуре за 5 - 10 мин стравливают образовавшийся в результате механических операций нарушенный слой:

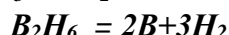
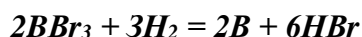


Закончив травление в хлористом водороде, прекращают его подачу, продувают систему водородом и начинают пропускать водород через основной 8 и легирующий 6 источники. Если необходимо получить эпитаксиальный слой *n*-типа, используют жидкие (PCl_3 , PBr_3) или газообразные (PH_3) легирующие вещества, содержащие фосфор или другие элементы этой группы. Слой *p*-типа получают легированием кремния, например бором, из его соединений, находящихся в жидком (BBr_3) или газообразном (B_2H_6) состоянии.

В результате реакции восстановления из тетрахлорида кремния SiCl_4 выделяется кремний, идущий на "строительство" эпитаксиальной пленки. Легирование этой пленки происходит в результате одной из следующих реакций:



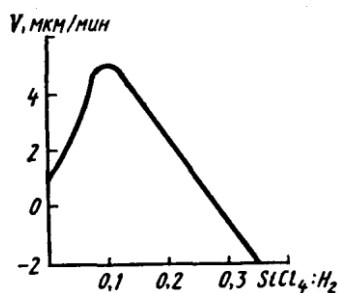
или



Необходимо отметить, что реакция восстановления тетрахлорида кремния водородом аналогична реакции травления кремния хлористым водородом, но происходит в обратном направлении. Это закономерно, так как протеканию реакции в определенном направлении способствует изменение не только температуры процесса (в данном случае она одинакова), но и

концентрации реагирующих веществ. Избыток HCl приводит к травлению кремния, а недостаток HCl и избыток H_2 - к эпитаксиальному наращиванию.

Таким образом, направление и полнота протекания основной реакции, а также скорость образования эпитаксиальной пленки зависят от соотношения $\text{SiCl}_4 : \text{H}_2$ (рис. 11). Максимальную скорость наращивания при температуре 1170°C получают, когда молярная концентрация SiCl_4 равна 0,1 г/л. Дальнейшее



увеличение концентрации SiCl_4 до 0,28-0,3 г/л приводит к относительному уменьшению количества водорода, избытку HCl , травлению им кремния и соответственно снижению скорости эпитаксиального наращивания. Обычно концентрация еще меньше и составляет 0,02 г/л, что позволяет создать условия формирования слоя, близкие к равновесным, и получить бездефектную кристаллическую решетку.

Рис. 11. Зависимость скорости эпитаксиального наращивания от соотношения $\text{SiCl}_4 : \text{H}_2$

Условия, при которых скорость выделения атомов кремния в результате реакции равна скорости их встраивания в кристаллическую решетку, называют *равновесными*.

Скорость роста эпитаксиального слоя зависит также от температуры и при 1100 , 1200 и 1270°C ее оптимальные значения соответственно составляют 0,1; 1,0 и 5,0 мкм/мин. Кристаллографическая ориентация также влияет на скорость наращивания. Так, в направлении $[100]$ слои растут медленнее, чем в направлении $[110]$.

Недостаток автолегирования - проникновение примесей через газовую фазу в растущий эпитаксиальный слой с обратной стороны подложек или их боковых поверхностей. Это явление в значительной степени зависит от температуры.

Существуют и другие реакции, используемые при эпитаксии. В зависимости от типа реакции и различных технологических факторов скорость получения высококачественных эпитаксиальных слоев составляет от 0,2 до 3 мкм/ч.

При *жидкофазной эпитаксии* атомы растущего слоя оседают на подложку из расплава или раствора. (В металлургии все высокотемпературные растворы называют расплавами.) При этом подложки покрывают насыщенным полупроводниковым материалом расплавом, из которого необходимо вырастить соответствующий слой, а затем охлаждают. При уменьшении температуры растворимость полупроводникового материала в расплаве (обычно в легкоплавком металле) понижается и избыточное количество полупроводника оседает на подложке.

Применительно к элементарным полупроводникам (Si , Ge) этот метод не нашел широкого применения из-за отсутствия легкоплавких металлов, способных растворять полупроводниковые материалы в больших концентрациях, не загрязняя их эпитаксиальные слои. Наиболее благоприятны для жидкофазной эпитаксии соединения типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ (например, алюминия, галлия и индия с фосфором, мышьяком, сурьмой), а также твердые растворы на их основе.

Жидкофазной эпитаксией можно получать слои полупроводников большой площади толщиной от долей микрометра до сотен микрометров, легировать с заданным распределением примеси по толщине, а также изготавливать многослойные структуры из трех- и четырехкомпонентных твердых

растворов. Качество *p-n* переходов, изготавливаемых жидкофазной эпитаксией, в большинстве случаев выше, чем получаемых другими методами.

Метод жидкофазной эпитаксии широко применяют при изготовлении оптоэлектронных и СВЧ-устройств, люминесцентных и фотоэлектрических приборов.

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ И ПАССИВИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

После механической и предэпитаксиальной подготовки и, если необходимо, после эпитаксии на поверхности подложек формируют защитное покрытие. В технологии изготовления полупроводниковых приборов и ИС в качестве защитных покрытий используют слои диоксида SiO_2 и нитрида Si_3N_4 кремния. Эти слои выполняют роль маски при локальной обработке полупроводниковых пластин, например их легирования в строго заданных местах. Кроме того, слои SiO_2 и Si_3N_4 служат для изоляции элементов ИС, в качестве подзатворного или диэлектрического слоя в МДП-структурах, основанием для размещения пленочных контактных площадок и тоководящих дорожек в ИС, межслойной изоляцией в многослойных коммутационных платах, а также для защиты кристаллов. Получение слоев SiO_2 и Si_3N_4 на подложках в сочетании с их литографической обработкой - важнейшие операция планарной технологии.

Слои диоксида кремния SiO_2 получили широкое применение, так как обладают следующими свойствами:

- равномерностью толщины, прочностью и сплошностью (отсутствуют трещины, каналы, поры и др.);
- достаточной чистотой (не содержат примесей и включений, приводящих к пробое, поверхностной электропроводности и снижению надежности);
- способностью защищать (маскировать) подложки от проникновения примесей при диффузии;
- температурными коэффициентами линейного расширения, близкими к ТКЛР кремния и других полупроводников (это снижает механические напряжения, приводящие к короблению пластин и растрескиванию слоев);
- высокими диэлектрическими характеристиками ($\epsilon = 3,2 - 8,0$; $\rho = 10^{13} - 10^{17}$ Ом*см).

В зависимости от способа получения слои SiO_2 обычно имеют толщину 0,2 - 1,5 мкм и плотность 2,15 - 2,3 г/см³.

Методы формирования слоев SiO_2 основаны на химическом взаимодействии окислителя с материалом пластин (например, термический, ионно-плазменный) или разложения соединений, поступающих извне (например, пиролиз).

Термическое окисление – наиболее распространенный метод получения слоев SiO_2 нагревом кремниевых пластин в окислительной атмосфере. Этот метод отличается от других высокими электрофизическими параметрами получаемых диоксидных слоев и возможностью совмещения с необходимыми технологическими процессами. Например, термическое окисление совмещают с разгонкой примесей (перераспределением примесей на второй стадии диффузии), так как оба эти процесса в большинстве случаев выполняются при одинаковой температуре.

Основными стадиями термического окисления являются:

- адсорбция окислителя вначале на поверхности кремния, а затем диоксида;
- перенос (диффузия) окислителя через слой диоксида;

• реакция окислителя с кремнием на границе раздела Si - SiO₂.

При достаточно высокой концентрации окислителя в газовой среде адсорбция не влияет на скорость процесса, а при правильно выбранной температуре (более 1000°C) не ограничивается скорость химического взаимодействия окислителя с материалом подложек.

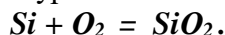
Основной стадией, определяющей скорость протекания процесса окисления, является диффузия о чем свидетельствует уменьшение скорости роста слоя диоксида кремния с увеличением его толщины.

Зависимость толщины слоя диоксида кремния от времени и других технологических параметров достаточно сложна и изменяется на протяжении всего процесса. Если считать, что давление окислителя отличается от атмосферного не более чем в 10 раз, а температура T строго поддерживается выше 1000°C, то после формирования слоя диоксида кремния толщиной более 0,01 мкм зависимость его толщины x от времени t может быть представлена в общем виде так:

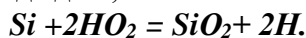
$$x^2 = Ae^{-\Delta E/kT},$$

где e - основание натурального логарифма; A - коэффициент пропорциональности; ΔE - энергия активации процесса, зависящая от физико-химических свойств окислителя и окисляемого вещества; k - постоянная Больцмана.

Термическое окисление кремния в сухом кислороде проводят при атмосферном давлении и температуре 1000 - 1200°C:

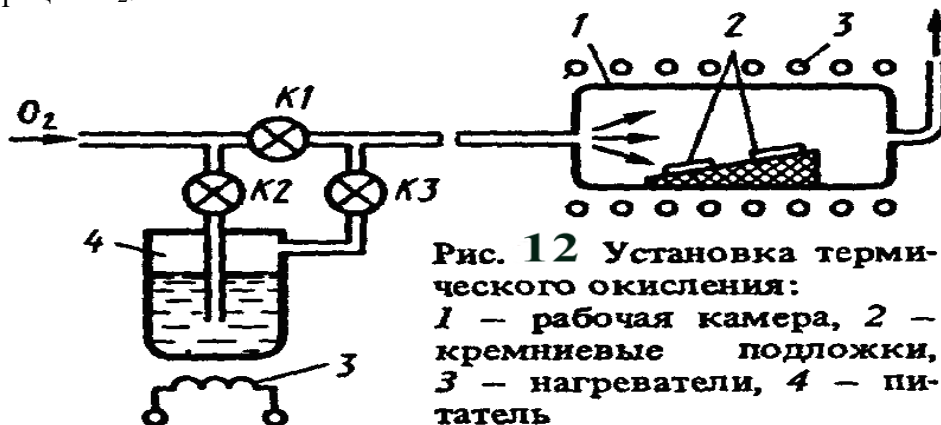


Скорость роста слоев диоксида составляет всего 0,04 - 0,06 мкм/ч. Термическое окисление кремния в атмосфере водяного пара увеличивает скорость образования слоя диоксида до 0,8 - 1 мкм/ч.



Термическое окисление кремния во влажном кислороде является комбинированным процессом, который позволяет создавать слои диоксида кремния оптимальной плотности с минимальным количеством дефектов при максимальной скорости.

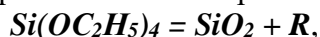
Обычно кремний окисляют на специальных установках (рис. 12) в три стадии: вначале в сухом кислороде в течение 15 мин (кран $K1$ открыт, а краны $K2$ и $K3$ закрыты), затем во влажном в течение 1 ч 45 мин ($K1$ - закрыт, $K2$ и $K3$ - открыты) и вновь в течение 1 ч в сухом для уплотнения (подсушивания) образовавшегося слоя SiO₂ за счет удаления гидроксильных групп OH и десорбции H₂.



Недостатком термического окисления кремния при атмосферном давлении и температуре более 1000°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. Повышением давления до 20 - 50 МПа можно активизировать процесс и снизить температуру до 400 - 700°C. В этом случае скорость роста слоя диоксида кремния составляет 1 - 2 мкм/ч. Однако при этом требуются особо прочные и герметичные установки и, кроме того, нельзя наращивать слои диоксида кремния на других полупроводниковых материалах.

Пиролитическим разложением легколетучих соединений кремния при высоких температурах наращивают слои диоксида кремния на подложках германия, арсенида галлия и др. Наиболее часто используют тетраэтоксисилан (ТЭОС), представляющий собой в обычных условиях жидкость, температура кипения которой равна 165°C, а температура разложения 600 - 750°C. При пиролитическом разложении тетраэтоксисилана протекает следующая реакция:

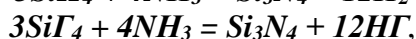
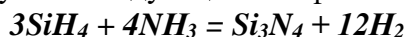


где **R** - газообразная смесь оксидов углерода и органических веществ.

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

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

Слои нитрида кремния Si_3N_4 обладают более высокими, чем слои SiO_2 , диэлектрическими свойствами, поэтому толщина их может быть примерно вдвое меньше. Так как азотирование, т.е. химическое взаимодействие кремния и азота, происходит при высокой температуре (1300°C) и скорость роста слоя Si_3N_4 мала, широкое применение получали следующие газофазные реакции:



где **G** — галоген (Cl, Br, J).

Прозрачные, без примесей, обладающие высокой плотностью и хорошей маскирующей способностью слои Si_3N_4 получают при температуре 600 - 1100°C и скорости роста 0,001 - 0,02 мкм/мин. Однако высокая химическая стойкость слоев Si_3N_4 затрудняет их травление при фотолитографии. Поэтому используют различные сочетания слоев SiO_2 и Si_3N_4 .

ЛИТОГРАФИЯ

Неотъемлемой частью технологии изготовления полупроводниковых приборов и ИС являются процессы *литографии*, основанные на использовании высокомолекулярных соединений, называемых *резистами* и обладающих способностью изменять свои свойства под действием различного рода излучений. При *фотолитографии* применяют ультрафиолетовое излучение, при *рентгенолучевой литографии* - рентгеновское, а при *электролитографии* - поток электронов.

Наиболее широкое распространение получила контактная (рис. 13, *а-в*) и проекционная фотолитография, с помощью которой в пленочных слоях или непосредственно на подложках создают по заданным рисункам высокоточные рельефы будущих полупроводниковых приборов и ИС. Рельефы могут быть сформированы в диэлектрических (SiO_2 , Si_3N_4), металлических (Al, Cu, Au, Ni) или полупроводниковых (Si, Ge) слоях.

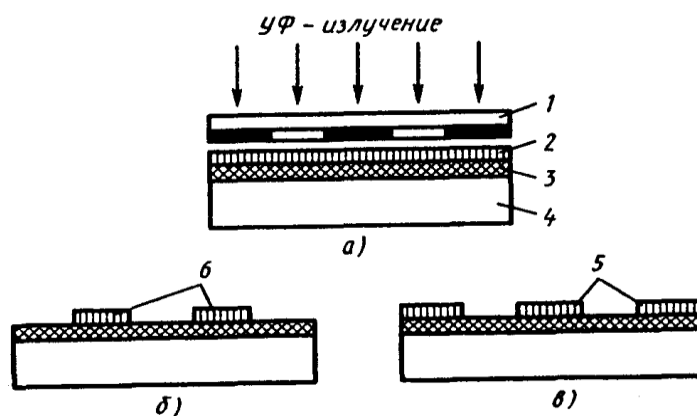


Рис. 13. Схема процесса фотолитографии

a - 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 позитивного и негативного фоторезистов.

Предварительно нанесенный на поверхность, например кремниевой подложки 4 со слоем 3 диоксида кремния (рис. 13, *a*), светочувствительный материал 2, называемый *фоторезистом*, подвергают воздействию ультрафиолетового излучения, т.е. экспонируют через специальную стеклянную маску - *фото шаблон* 1, имеющий прозрачные и непрозрачные участки. 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 ультрафиолетовое излучение (рис. 13, *б*), его называют *негативным*, а если растворяется и удаляется (рис. 13, *в*), его называют *позитивным*.

Свойства фоторезистов характеризуют рядом параметров.

Светочувствительность - это способность фоторезиста изменять свои свойства под действием светового излучения. Светочувствительность фоторезистов $S = 1 / Et = 1 / H$ (где E - энергооблученность, Вт/см², t - длительность облучения (выдержка), с; H - экспозиция, Вт * с/см²) зависит от их физико-химических свойств и тем больше, чем меньше экспозиция. Необходимо, чтобы спектр излучения источника света максимально возможно совпадал со спектром поглощения фоторезиста. Большинство фоторезистов обладает максимальной светочувствительностью в ультрафиолетовой области спектра, т.е. в диапазоне длин волн 300—500 нм.

Разрешающая способность - это максимально возможное количество линий, разделенных промежутками такой же ширины на 1 мм поверхности, которое может быть воспроизведено в слое фоторезиста, т.е. $R = 1000 / (2 * l)$, где R - разрешающая способность, лин/мм, l - ширина линии (промежутка), мкм. Иногда R - это наименьший размер элемента в микрометрах.

Разрешающая способность в основном зависит от зернистости и дисперсности фоторезиста.

Кислотостойкость - это способность фоторезиста противостоять воздействию кислот (HF, HNO₃, HCl и др.), а в некоторых случаях и щелочей (KOH, NaOH и др.). Так как единого метода определения кислотостойкости фоторезистов нет, ее обычно характеризуют временем, в течение которого они выдерживают воздействие определенных химических реактивов. Кислотостойкость зависит также от состава полимерной основы фоторезиста.

Например, желатин, гуммиарабик и шеллак имеют низкую кислотостойкость, а эпоксидные смолы, каучуки - высокую и позволяют проводить "глубинное" травление Si (до 100 мкм). Кроме того, кислотостойкость зависит от адгезии, толщины и качества слоя фоторезиста (отсутствия пустот, трещин, пор и др.).

Промышленностью выпускаются как позитивные фоторезисты (ФП-330, ФП-333, ФП-334, ФП-309, ФП-617, ФП-618, ФП-626, ФП-636 и др.), обеспечивающие при толщине слоя 0,3—0,4 мкм формирование линий шириной 1 - 2 мкм, так и негативные (ФН-106, ФН-11, ФН-11К, ФН-4ТВ и др.), позволяющие при толщине слоя 0,4 - 0,5 мкм получать линии шириной 2 - 3 мкм.

Фотолитография состоит из ряда операций, которые выполняют в определенной последовательности.

Очистку поверхности подложек производят различными методами, выбор которых зависит от материала, на который наносят фоторезист, и степени загрязненности: обработкой в парах трихлорэтилена, кипячением в азотной кислоте или деионизованной воде, с помощью ультразвука, термообработкой.

Нанесение фоторезиста является одной из важнейших операций. От качества ее выполнения и толщины нанесенного слоя фоторезиста зависят его разрешающая способность, кислотостойкость и адгезия, а также воспроизводимость геометрических размеров элементов изготавливаемых ИС. Чаще всего фоторезист наносят центрифугированием, помещая подложки в центре платформы центрифуги и прижимая их вакуумным присосом. При вращении платформы слой нанесенного на подложки фоторезиста равномерно распределяется по их поверхности. В зависимости от вязкости фоторезиста и частоты вращения центрифуги (500 - 8000 об/мин) обычно за 20 - 30 с формируется слой фоторезиста толщиной 0,5 - 20 мкм.

Кроме того, применяют электростатическое нанесение фоторезиста, распыление его специальным пульверизатором, окунающие и накатку вальцами.

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 - 120°C не более 20 мин.

Совмещение фотошаблона с подложкой может выполняться оператором визуально при наблюдении фигур совмещения. Точность этого метода $\pm(0,25 - 1)$ мкм, а автоматизированного фотоэлектрического - не ниже 0,05 - 0,1 мкм.

При экспонировании фоторезистов используют ультрафиолетовые лампы СВД-120, СВДШ-250 или ДРШ-500, обеспечивающие неравномерность освещения 5-10% по полю подложки. Время экспонирования 1 - 2 мин.

Так как при контактной фотолитографии фотошаблон прижимают к поверхности подложки, большое значение имеет механическая прочность нанесенного на него рисунка (прозрачных и непрозрачных участков). Наименее прочны эмульсионные фотошаблоны (стеклянные пластины с экспонированной эмульсией), выдерживающие не более 20 - 30 контактов. Поэтому их обычно используют только в качестве *эталонных фотошаблонов*, с которых снимают копии - *рабочие фотошаблоны*. Рабочие фотошаблоны выполняют в виде стеклянных пластин размером 70 · 70 · 2,5 мм с нанесенной на них пленкой хрома толщиной 0,1 мкм, в которой вытравлен необходимый рисунок. Такие фотошаблоны имеют высокую износостойкость, но обладают значительной отражательной способностью (50 - 60%), что вызывает боковое засвечивание фоторезиста и снижает его разрешающую способность. Минимальный размер воспроизводимых элементов 2 мкм.

Этого недостатка лишены цветные фотошаблоны (красно-оранжевого цвета), на поверхность стеклянного основания которых нанесена пленка Fe_2O_3 и $\text{Fe}(\text{CO})_5$. Отражательная способность таких фотошаблонов 10 - 15%, а минимальные размер воспроизводимых элементов до 1 мкм.

При проявлении негативных и позитивных фоторезистов в специальных растворителях удаляют соответственно неэкспонированные и экспонированные участки.

При второй сушке (задубливании) 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 - 180°C 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 полупроводниковых приборов и элементов ИС. При этом используемые травители должны быть избирательными, т.е. растворять данный слой и не воздействовать на лежащие ниже. Так, для травления SiO_2 применяют водный раствор плавиковой кислоты HF.

Кроме химического травления широко применяют также методы, которые были описаны раньше.

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

Рентгенолучевая литография основана на воздействии мягкого рентгеновского излучения (ускоряющее напряжение $U = 8$ кВ) на рентгенорезист и позволяет за счет более коротких длин волн, чем при ультрафиолетовом излучении, получать размеры элементов 0,3 - 0,5 мкм. В качестве рентгенорезиста используют материал на основе полиметилметакрилата, отличающийся высокой стабильностью свойств, нечувствительностью к ультрафиолетовому излучению и достаточной кислотостойкостью (кроме HCl). Рентгеношаблоны обычно изготавливают из кремния, так как он хорошо пропускает рентгеновские лучи, а рисунок выполняют в виде тонкой золотой пленки, их не пропускающей.

Отсутствие отражения и рассеяния, а также контакта между резистом и рентгеношаблоном и нечувствительность к загрязнениям (рентгеновское излучение практически не поглощается) позволяют считать рентгенолучевую литографию перспективным методом создания БИС и СБИС с субмикронными (менее 1 мкм) размерами элементов.

Электролитография, позволяющая еще более повысить разрешающую способность (минимальные размеры элементов составляют 0,1 - 0,15 мкм), основана на взаимодействии пучка ускоренных электронов с электронорезистом - полимерным материалом, нечувствительным к ультрафиолетовому излучению. При этом экспонирование может производиться как сфокусированным пучком электронов, так и его сканированием по заданной программе, что исключает применение фотошаблонов.

ЛЕГИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПОДЛОЖЕК

Одним из основных процессов современной технологии изготовления полупроводниковых приборов и ИС является легирование - дозированное

введение примесей в полупроводниковый материал для изменения его электропроводности. В зависимости от физики процесса и применяемого технологического оборудования различают следующие методы легирования: высокотемпературную и радиационно-стимулированную диффузию, а также ионную имплантацию.

Высокотемпературная диффузия основана на перераспределении частиц одного вещества в другом в направлении убывания концентрации при тепловом воздействии.

Математическое описание диффузионных процессов было сделано в 1855 г. немецким ученым А. Фиком и в общем виде может быть представлено следующим уравнением:

$$J = -D \Delta N,$$

где ΔN - градиент концентрации частиц (атомов примеси); D - коэффициент диффузии; J - плотность потока, т.е. число частиц, проходящих в единицу времени через единицу площади. Знак минус показывает, что диффузии идет в направлении убывания концентрации.

Мерой скорости диффузии является коэффициент диффузии

$$D = D_0 e^{-\Delta E / k T},$$

где D_0 - величина, постоянная для данного вещества; ΔE — энергия, необходимая атому для диффузии (энергия активации); k - постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-16}$ Дж/К; T - температура диффузии, К.

Скорость диффузии, определяемая подвижностью диффундирующих в кристаллической решетке полупроводника атомов, зависит от идеальности их расположения в реальном кристалле, а также от выбранного кристаллографического направления.

Теоретически в реальных кристаллах предполагаются три механизма диффузии: взаимным замещением атомов; по междоузлиям; по вакансиям. Основные электрически активные примеси образуют в полупроводнике твердые растворы замещения (например, бор и фосфор в кремнии), диффузия в которых может происходить одновременно тремя способами. Однако будут преобладать два последних, так как при них энергия активации значительно меньше, чем при первом.

Существенное влияние на скорость диффузии оказывает наличие примесей в исходной подложке полупроводника.

Диффузия - это объемный процесс, т.е. вещество перераспределяется в объеме исходной подложки полупроводника по трем направлениям (координатным осям x , y , z). Рассмотрим частный случай, когда вещество диффундирует с поверхности подложки вглубь, например по координате x . Такое допущение правомерно, если глубина диффузии значительно меньше, чем площадь, на которой она происходит. Диффузию проводят из неограниченного или ограниченного источника примеси.

При диффузии из неограниченного источника (бесконечного, постоянного) количество примеси, уходящей с поверхности подложки в ее объем, равно количеству примеси, поступающей на нее извне. Другими словами, концентрация N вводимой примеси, называемой *диффузантом*, на поверхности подложки постоянна. Если обозначить x - расстояние от поверхности в глубь пластины, N_0 - поверхностную концентрацию примеси, $N(x, t)$ - концентрацию примеси на любой глубине x в любое время t , то $N(x, t) = f(N_0; D; x; t)$.

Следовательно, можно заранее рассчитать, какое количество примеси, на какой глубине от поверхности подложки и через какое время будет находиться в процессе диффузии с учетом физико-химических свойств

подложки и диффузанта, а также температуры процесса. Графически распределение примеси при диффузии из неограниченного источника показано на рис. 14, а.

Диффузию из ограниченного (конечного) источника примеси проводят в две стадии. Вначале в тонком приповерхностном слое подложки создают концентрацию примеси N_o (загонка примеси). 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 диффузия примеси в глубь пластины (разгонка) и поверхностная концентрация N_o примеси уменьшается. Графически распределение примеси при диффузии из ограниченного источника показано на рис. 14, б.

Реальные полупроводниковые подложки имеют определенную концентрацию основной легирующей примеси. Так, кремниевая подложка 2, показанная на рис. 15, до создания диффузионной области 3 была n -типа электропроводимости, т.е. имела неизменную по всей толщине концентрацию N_o^n примеси. Диффузией акцепторной примеси в соответствующие места поверхности была создана некоторая поверхностная концентрация этой примеси N_o^p . При этом на определенном расстоянии от поверхности подложки концентрация донорной и акцепторной примесей стали одинаковыми. Точка 1 инверсии типа электропроводности соответствует уравниванию донорной и акцепторной примесей и характеризует глубину залегания p - n перехода (X_{p-n}).

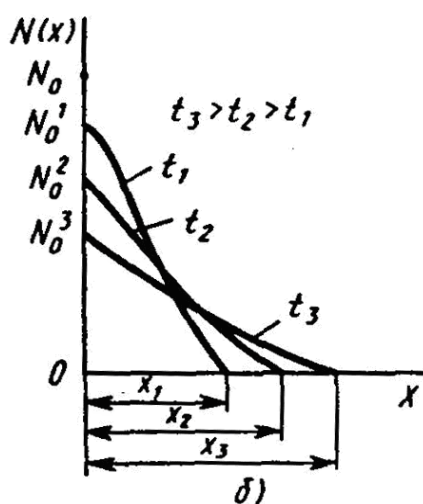
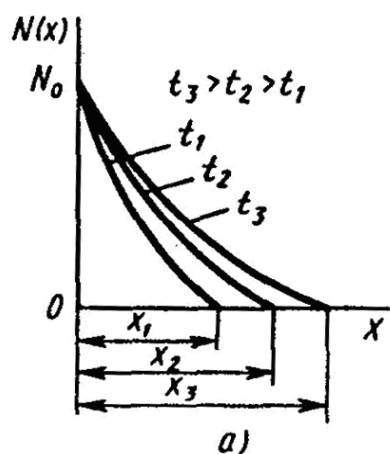


Рис. 14. Распределение примеси при диффузии из постоянного (а) и ограниченного (б) источников

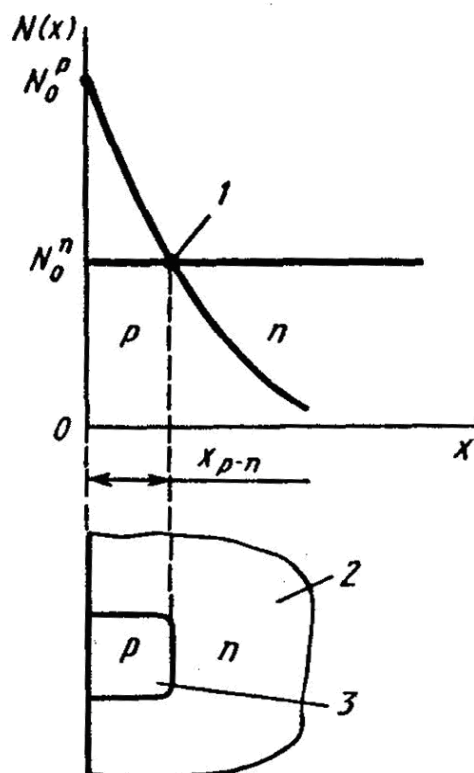


Рис. 15. Реальное распределение примеси в кремниевой подложке n-типа:

1 – точка инверсии типа электропроводности, 2 – кремниевая подложка, 3 – диффузионная область

Диффузию обычно проводят при 1000-1300°C, так как ниже 1000°C значения коэффициента диффузии D очень малы и глубина залегания p - n перехода незначительна, а выше 1300°C - получают диффузионные слои низкого качества и резко снижается стойкость кварцевого реактора.

Диффузию проводят на установках в закрытой, открытой или полуоткрытой трубе (рис. 16, а-в).

При первом способе (рис. 16, а) подложки 1 и диффузант 3 загружают в кварцевую трубу 2, которую вакуумируют и в виде герметичной ампулы помещают в печь 4.

При втором способе (рис. 16, б) 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. 16, в) 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 полукруглым 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 микрозоры между уплотнением 7, трубой 2 и ее 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.

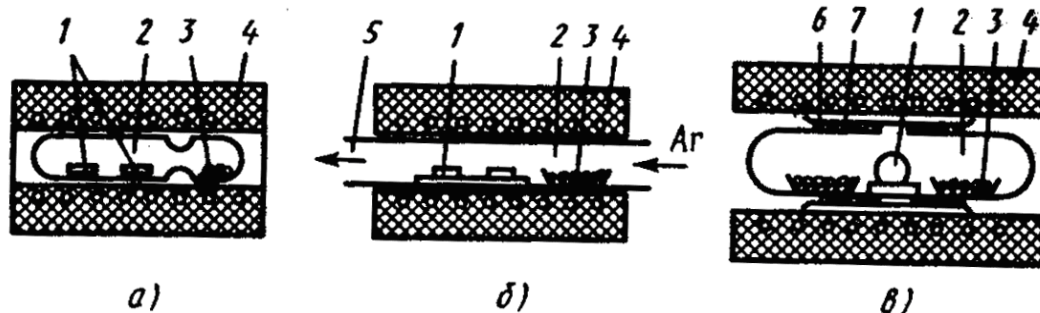


Рис. 16. Схемы проведения диффузии в закрытой (а), открытой (б) и полуоткрытой (в) трубах: 1 - кремниевая подложка, 2 - кварцевая труба, 3 - диффузант, 4 - печь, 5 - выходной конец трубы, 6 - кварцевая муфта, 7 - уплотнение

В качестве диффузантов используют твердые, жидкие или газообразные вещества. диффузантами для кремния являются акцепторные примеси В, Al, Ga, In и донорные примеси Р, As, Sb, которые, как правило, применяют в виде оксидов (P_2O_5 , B_2O_3 , As_2O_3), оксихлоридов ($POCl_3$), галогенидов (PBr_3 , PCl_3 , BBr_3), гидридов (PH_3 , B_2H_6 , AsH_3).

В закрытой трубе диффузию проводят в одну стадию, в открытой - как в одну, так и в две стадии, а в полузакрытой - в две. Двухстадийная диффузия более управляема, воспроизводима и контроль ее проще.

Высокотемпературная диффузия, являющаяся основой современной планарной технология, позволяет получать в полупроводнике легированные слои толщиной до единиц микрометра. Формировать этим методом слои толщиной менее 1 мкм невозможно, так как при неоднократном проведении процесса высокая температура способствует перераспределению примесей в ранее полученных диффузионных областях, смещению $p-n$ переходов и необратимому изменению электрофизических свойств основного полупроводника. Поэтому было разработано и освоено ионное легирование (ионная имплантация).

Ионная имплантация - это введение в полупроводник необходимых примесей в виде ионов. Обладая большой энергией (до 1000 кэВ), ионы примеси проникают через поверхность полупроводника в его кристаллическую решетку. В результате столкновений с атомами, расположенными в узлах кристаллической решетки, ионы примеси смещают их в междоузлия с образованием вакансий или междоузельных атомов. Так как энергия ионов примеси в 100 - 1000 раз больше энергии связи атомов в решетке полупроводника, каждому из них передается огромное количество энергии. Этот лавинообразный процесс вызывает каскад последовательных смещений в кристаллической решетке, разупорядочение ее и возникновение нескольких тысяч точечных дефектов. Поэтому полупроводниковые подложки для восстановления их кристаллической структуры и снятия напряжений после ионного легирования отжигают при 600 - 800°C или обрабатывают лазером.

Ионное легирование проводят на установке, схема которой показана на рис. 17. Легирующее вещество, предварительно переведенное в парообразное состояние, ионизируют электронной бомбардировкой, дуговым разрядом или действием различных излучений в ионизационной камере 1. Ускоренный электрическим полем (сотни киловольт) поток ионов с помощью фокусирующей системы 2 направляют на определенный участок поверхности полупроводниковой подложки 5. Так как легирующие вещества применяются в виде соединений, в потоке ионов одновременно присутствуют как необходимые

для легирования ионы (например, Р, В), так и бесполезные (Сl, Вг и др.) - специальное устройство - масс-сепаратор 3 разделяет ионы по массам, а система сканирования 4, связанная с ЭВМ, управляет перемещением потока легирующих ионов по поверхности полупроводниковой подложки 5 в соответствии с заданной программой.



Ионное легирование широко применяют при изготовлении БИС и СБИС, так как при этом методе возможно точное и воспроизводимое дозирование внедряемой примеси в результате строгого контроля тока ионного пучка и времени облучения, а также проведения процесса за несколько минут, что невозможно при термической диффузии. Кроме того, ионное легирование позволяет формировать *p-n* переходы с точностью до 0,02 мкм и совместимо с другими технологическими процессами.

Вместе с тем следует отметить такие недостатки ионного легирования, вызывающие некоторые ограничения его применения, как отжиг полупроводниковых подложек при температурах в несколько сотен градусов, сложность создания глубоко легированных областей, а также расфокусировку ионного пучка при обработке подложек больших диаметров, обусловленную значительным его отклонением от главной оси.

НАНЕСЕНИЕ ТОЛСТЫХ ПЛЕНОК

Технология изготовления толсто пленочных ИС основана на использовании *трафаретной печати*. Сущность технологии заключается в нанесении на керамическую подложку через сетчатый трафарет паст - специально приготовленных композиций из функционального, связующего и органического материалов с последующим их вжиганием в подложку для придания заданных физических свойств.

Пасты в зависимости от назначения называют проводящими, резистивными или диэлектрическими.

В качестве функциональных материалов для проводящих паст используют металлы и сплавы (серебро, золото, палладий, платину, радий и их соединения), для резистивных - благородные металлы и комбинации металлов с окислами (окись таллия, окись палладия, окись рения и др.), для диэлектрических - керамические материалы с высокой диэлектрической проницаемостью, чаще всего на основе ВаТiОз. Функциональные материалы вводят в пасту в виде мелких частиц с максимальным размером не более 5 мкм. Распределение размеров и форма частиц оказывают сильное влияние на физические и электрические свойства пленок.

Постоянный связующий материал удерживает частицы функционального материала в состоянии точечных контактов в течение обжига и способствует закреплению пленки на подложке. В качестве связующего материала применяют легкоплавкие стекла.

Органические материалы (жидкости на основе воды, спиртов, скипидара, смол с другими добавками) вводят в пасту в качестве связующего и для придания ей текучести, необходимой при трафаретной печати.

Изготовление паст включает в себя приготовление компонентов и смешивание их в соответствующей пропорции до получения гомогенной структуры, для обеспечения трафаретной печати пасты должны обладать определенными вязкостью и поверхностным натяжением.

Нанесение паст на подложку осуществляют с помощью специальных установок, состоящих из следующих основных узлов: держателя трафарета, держателя подложки, ракеля, держателя ракеля и привода для перемещения ракеля.

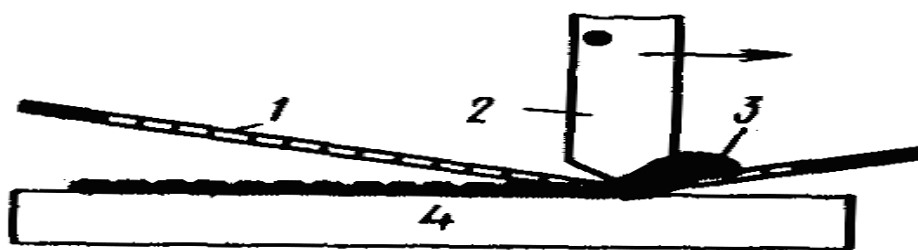
Необходимую конфигурацию наносимых на подложку паст получают путем продавливания паст через трафарет при перемещении ракеля. В толстопленочной технологии применяют два вида трафаретов: цельнометаллические и сетчатые.

Цельнометаллические трафареты представляют собой металлическую фольгу толщиной, равной толщине наносимой пасты; необходимый рисунок создается путем травления фольги.

Сетчатые трафареты в качестве основы имеют проволочную сетку из нержавеющей стали или капрона, равномерно натянутую на раме. Диаметр проволоки и размеры ячеек могут быть различными в зависимости от требований технологии. На практике наибольшее применение получили сетки с размером окна 120 мкм и диаметром проволоки 40 мкм. Рисунок на трафарете формируется с помощью фотолитографии в слое фоточувствительной эмульсии, наносимой на сетку. Трафаретную печать с применением сеточного трафарета называют сеткографией.

Схема процесса нанесения паст приведена на рис. 18. При нанесении паста подвергается воздействию очень сложной системы сил: сил тяжести, давления лезвия ракеля, сил поверхностного натяжения на границе раздела трафарета и подложки.

Ракель перемещает пасту, и она попадает в отверстия в трафарете. По мере приближения ракеля к отверстию трафарет прогибается и нижняя его поверхность (на которой нанесен рисунок элемента), приходит в соприкосновение с подложкой. Гибкое лезвие ракеля продавливает пасту в отверстия в трафарете. После этого трафарет под действием сил натяжения проволоки сетки возвращается в первоначальное положение над подложкой. От вязкости пасты и характера смачивания подложки и проволок трафарета зависит количество пасты, попадающей на подложку и возвращающейся с трафаретом. Окончательная форма высушенного отпечатка пасты зависит от равновесия сил тяжести, взаимодействия пасты с подложкой, предела текучести, вязкости пасты и др.



18. Схема процесса нанесения пасты через сетчатые трафареты:

1 - трафарет; 2 - ракель; 3 - паста; 4 – подложка

На качество нанесения пасты влияют следующие основные факторы: размер сетки трафарета, форма и материал ракеля, расстояние трафарета от подложки, давление и скорость перемещения ракеля.

После нанесения пасты подвергают вжиганию. Процесс вжигания подразделяют на три этапа: сушку, удаление органического связующего и высокотемпературный обжиг.

Сушку производят при низкой температуре (не более 125°C) в туннельной печи с конвейерной подачей с электрическим и радиационным нагревом. При этом удаляются наиболее летучие органические вещества. Первоначальная сушка не обеспечивает полного удаления органических добавок. Поэтому перед обжигом осуществляют дополнительный нагрев для полного удаления органического связующего.

Полное удаление органических добавок и высокотемпературный обжиг происходят в конвейерной печи, в которой предусмотрены две зоны: низкотемпературная и высокотемпературная. Типичный температурный профиль, устанавливаемый по длине печи, показан на рис. 19.

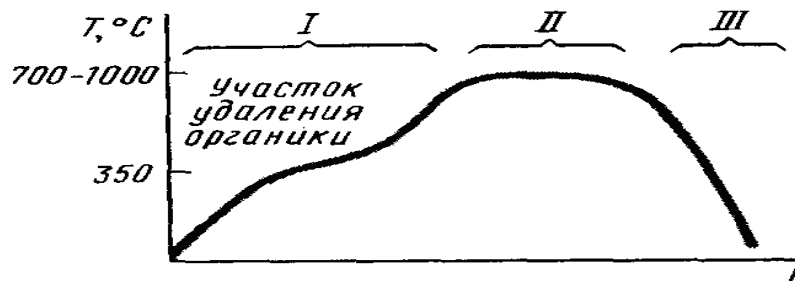


Рис. 19. Распределение температуры в печи при вжигании паст: I - зона предварительного нагрева; II - горячая зона (максимальная температура); III - зона охлаждения

При обжиге толстые пленки приобретают необходимые физические и электрические свойства. В зависимости от назначения пленки и ее исходного состава режимы термообработки различны.

Вследствие влияния на процесс нанесения толстых пленок большого количества неконтролируемых факторов изготавливаемые по данной технологии резисторы и конденсаторы имеют большой разброс параметров по номинальным значениям. Поэтому производят подгонку этих элементов до заданного номинала путем прорезания в резисторе щелей и пазов с целью изменения соотношения геометрических размеров, за счет чего увеличивается сопротивление, либо удаляют часть верхней обкладки конденсатора, благодаря чему уменьшается емкость. На практике для этого используют лазерную подгонку, которая обеспечивает получение толстопленочных элементов с допуском (10 -15)%. По толстопленочной технологии наносят проводящие, резистивные,

диэлектрические и изолирующие пленки. Кроме того, ее применяют для создания многослойной разводки в гибридных БИС.

Основное преимущество технологии нанесения толстых пленок - простота применяемого оборудования и низкая стоимость производства.

К недостаткам следует отнести то, что толстые пленки имеют большие размеры, а элементы на их основе - меньшую точность воспроизведения номинальных значений по сравнению с тонкими пленками. Для устранения этих недостатков разрабатываются новые трафареты и пасты, позволяющие осуществлять фотолитографическую обработку.

НАНЕСЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК

В производстве полупроводниковых приборов и ИС широко используются тонкие металлические и диэлектрические пленки.

Металлические пленки применяют для изготовления тонкопленочных резисторов и конденсаторов, коммутационных элементов и контактных площадок, омических контактов и т.п. В зависимости от назначения элементов ИС используют как пленки из платины, золота, серебра, никеля, хрома, меди, алюминия, титана, молибдена, так и многослойные пленочные структуры.

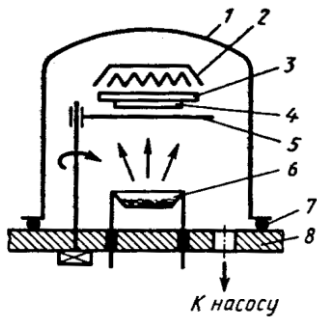
Диэлектрические пленки (SiO , SiO_2 , GeO , Al_2O_3 , Si_3N_4 и т.д.) используют для изготовления тонкопленочных конденсаторов, защиты тонкопленочных элементов, *p-n* переходов и поверхности полупроводниковых пластин, создания межслойной изоляции в многослойных коммутационных платах и др.

Наибольшее распространение получили следующие методы нанесения тонких пленок: термическим испарением материалов в вакууме (резистивным и высокочастотным нагревом, нагревом электронным лучом или лазером), ионным распылением (катодным, ионно-плазменным или магнетронным) и ионно-термическим испарением.

Термическое испарение в вакууме по сравнению с другими методами обладает рядом преимуществ. Так, в высоком вакууме ($10^{-3} - 10^{-7}$ Па) можно наносить особо чистые пленки, т.е. мало загрязненные молекулами остаточных газов (O_2 , H_2 , N_2 , CO_2 и др.). Относительная простота метода, а также возможность автоматизация процесса позволяют осаждать пленки с воспроизводимыми параметрами. Кроме того, этот метод наиболее выгоден при изготовлении БИС и СБИС, размеры элементов которых должны быть очень точными.

Термическое испарение основано на создании направленного потока пара вещества и последующей его конденсации на поверхности подложек, температура которых ниже температуры источника пара. Рабочая камера установки термического испарения (рис. 20) представляет собой цилиндрический металлический или стеклянный колпак **1**, размещенный на опорной плите **8** и уплотненный резиновой прокладкой **7**. Внутри рабочей камеры располагаются подложкодержатель **3** с подложками **4**, их нагреватель **2** и испаритель **6**. Между испарителем и подложками имеется заслонка **5**, позволяющая в нужный момент прекращать подачу испаряемого вещества. Рабочая камера откачивается вакуумным насосом до давления $10^{-3} - 10^{-4}$ Па, которое измеряется вакуумметром.

Процесс термического испарения состоит из трех основных этапов: испарения вещества; переноса его паров к подложкам; конденсации на них и образовании пленочной структуры.



При нагревании до определенной температуры вещество испаряется, кинетическая энергия его частиц (атомов и молекул) возрастает, в результате чего увеличивается вероятность разрывов межатомных и межмолекулярных связей.

Рис. 20. Схема термического испарения в вакууме:

1 - колпак, 2 - нагреватель подложек, 3 - подложкодержатель, 4 - подложка, 5 - заслонка, 6 - испаритель, 7- уплотнительная прокладка, 8 - опорная

плита

Отрываясь от поверхности, частицы вещества распространяются в свободном пространстве, образуя пар. При этом возможны две схемы испарения: твердая фаза - жидкая фаза - парообразная фаза и твердая фаза - парообразная фаза. Вторую схему испарения называют *возгонкой* или *сублимацией*. При этом частицы вещества испаряются с поверхности, создавая в замкнутом объеме V некоторое давление пара p . Одновременно происходит обратный процесс - конденсация. При $V = \text{const}$, $T = \text{const}$ и $p = \text{const}$ скорости испарения $v_{\text{и}}$ и конденсации $v_{\text{к}}$ равны. Условия, при которых соблюдается равенство, называют *равновесными* (состояние насыщения), а образующийся при этом пар - *насыщенным*.

Температуру, при которой давление насыщенного пара вещества примерно равно 1 Па, называют *температурой испарения*. При нанесении пленок вещество должно испаряться в молекулярном режиме, так как при этом создается молекулярный пучок, частицы которого перемещаются от испарителя к подложке прямолинейно, без столкновений и рассеяния. Эти условия достигаются при давлении остаточных газов $p < 10^{-2}$ Па, а насыщенного пара $p_s < 10^2$ Па, т.е. при невысокой скорости испарения $v_{\text{и}}$.

При $p_s > 10^2$ Па скорость испарения достаточно велика и над поверхностью подложек образуется слой пара, затрудняющий испарение. При $p > 10^{-2}$ также создаются условия для немолекулярного режима испарения, так как длина свободного пробега частиц λ меньше расстояния между подложкой и испарителем d .

Как следует из табл. 1, для выполнения условия $\lambda \geq d$ и создания прямолинейной траектории движения частиц необходимо давление не выше 10^{-2} Па, так как обычно расстояния $d = 15 - 20$ мм.

Таблица 1. Зависимость длины свободного пробега частиц от давления остаточных газов

p , Па	1,0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
λ , м	10^{-3}	$7 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-1}$	7	$7 \cdot 10^1$

Конденсация паров зависит от температуры подложки и плотности молекулярного пучка. Приближаясь к подложке, частицы вещества попадают в поле сил притяжения ее поверхностных атомов и молекул. Вместе с тем на очень близком расстоянии на частицы вещества действуют также силы отталкивания. Атомы (молекулы) испаряемого вещества, достигшие подложки, могут мгновенно отразиться от нее (упругое столкновение), адсорбироваться и через некоторое время вновь отразиться (реиспариться), а также адсорбироваться и после кратковременного мигрирования по поверхности остаться на ней, т.е.

происходит конденсация. Если энергия связи частиц вещества с атомами подложки больше средней энергии атомов подложки, они конденсируются, а в ином случае отражаются от нее.

Температура подложки, выше которой частицы вещества отражаются от ее поверхности и пленка при этом не образуется, называемая *критической температурой*, зависит от физико-химических свойств материалов осаждаемой пленки и подложки, а также от состояния поверхности подложки.

Наименьшую плотность, при которой частицы осаждаемого вещества конденсируются на подложке при данной ее температуре, называют *критической плотностью молекулярного потока*. При нахождении молекулами осаждаемого вещества мест, соответствующих минимуму свободной энергии системы молекула - подложка, образуются зародыши. Рост зародышей происходит в результате присоединения новых молекул, мигрирующих по поверхности или попадающих на зародыш непосредственно из пространства между источником и подложкой.

Размер зародыша, при котором он обладает минимальной устойчивостью, называется *критическим*. Зародыш критического размера при удалении даже одной молекулы распадается и, наоборот, при добавлении ее становится более устойчивым. При росте и объединении зародышей образуются островковые структуры, а затем - сплошная пленка.

Электrofизические параметры тонких пленок, их надежность и качество зависят от таких основных технологических факторов, как давление остаточных газов p , температура подложек T_n и испарения T_u , кроме того, условий термообработки нанесенной пленки (температуры, времени, среды).

Как уже отмечалось, при большом давлении в рабочей камере присутствуют остаточные и другие газы, которые не только уменьшают среднюю длину свободного пробега молекул, но насыщают пленку, химически взаимодействуют с ней, образуя соединения, изменяющие первоначальные свойства осаждаемого вещества.

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

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

Проволочные испарители просты по конструкции, хорошо компенсируют тепловое расширение, но недолговечны, не позволяют испарять сыпучие вещества и объем их мал.

Ленточные испарители для устранения тепловой деформации имеют компенсаторы и позволяют испарять большее, чем проволочные, количество вещества. Материалы, склонные к разбрызгиванию и выбрасыванию крупных частиц, осаждают из испарителей, снабженных сетчатой крышкой.

Графитовые и из диборида титана испарители применяют при осаждении материалов, имеющих $T > 2200$ °C.

В тигельных испарителях из теплостойкой керамики (Al_2O_3 , BeO, ThO) устранен непосредственный контакт нагревателя с испаряемым материалом и значительно увеличена загрузка.

Недостатки резистивных испарителей - загрязнение наносимой пленки материалом нагревателя или тигля, малый срок службы, невозможность испарения тугоплавких металлов.

Электронно-лучевые испарители основаны на преобразовании кинетической энергии электронов в энергию нагрева при бомбардировке ими испаряемого материала. Эти испарители применяются при нанесении пленок тугоплавких материалов, не загрязняя 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.

Индукционные испарители основаны на разогреве материала высокочастотным магнитным полем, создаваемым индуктором. Основной недостаток этих испарителей - значительная зависимость скорости испарения вещества от его массы.

Катодное, ионно-плазменное и магнетронное распыление существенно отличаются от термического испарения. Так, при катодном распылении материалов, особенность которого состоит в том, что пленка формируется в газовом разряде, процесс происходит при давлении от 1 до 10^2 Па и меньшей, чем при термическом испарении, скорости роста пленки.

Катодное распыление основано на том, что поток положительно заряженных ионов газа (например, аргона), получивших энергию от сотен электронвольт до единиц килоэлектронвольт, направляют на мишень, выполненную из распыляемого вещества. Ионной бомбардировкой из мишени выбиваются частицы вещества, которые оседают на подложке в виде тонкой пленки.

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

В *диодных источниках* поток электронов, необходимый для ионизации рабочего газа, образуется в результате автоэлектронной эмиссии. В таких источниках бомбардируемая нонами газа мишень одновременно является катодом и поэтому называется *катодом-мишенью*. Осаждение вещества происходит на подложку, располагаемую на аноде. Если распыляемая мишень металлическая, распыление ведется при постоянном токе, а если диэлектрическая, - при переменном. Во втором случае при отрицательной полярности мишень распыляется, а при положительной с нее снимается накопленный отрицательный заряд.

Диодные системы (рис. 21, а) наиболее просты и состоят из катода-мишени 1, анода 3 и подложки 2, размещенных в рабочей камере, в которой первоначально создается вакуум $10^{-3} - 10^{-4}$ 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 разряд и образуется плазма. Положительные ионы плазмы, ускоряясь, устремляются к катоду-мишени, бомбардируют и распыляют ее.

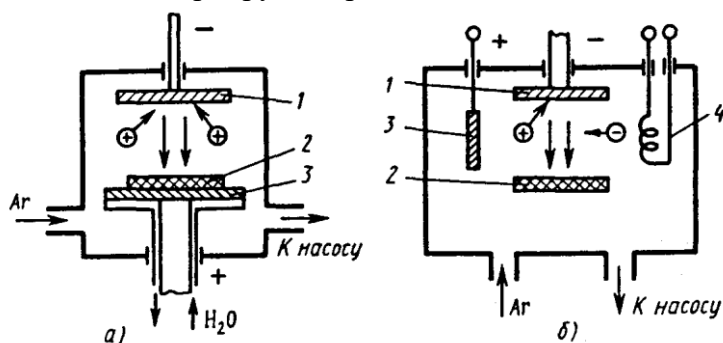


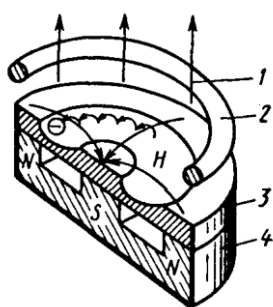
Рис. 21 Ионные источники испарения
а-диодный, б-триодный, 1-катод-мишень, 2-подложка, 3-анод, 4-термокатод

В *триодных источниках*, называемых также *ионно-плазменными источниками распыления* (рис. 21, б), третий электрод выполняет функцию

термоэмиссионного катода, увеличивая концентрацию электронов, а следовательно, и ионизированных атомов рабочего газа (аргона). Причем увеличение количества ионов аргона возможно при уменьшении его давления до 10^{-1} - 10^{-2} Па, что обеспечивает нанесение пленок, не загрязненных посторонними примесями. Кроме того, наличие термокатода позволяет приблизить мишень к подложке, что увеличивает скорость нанесения пленки. Как и в диодных источниках, рабочую камеру предварительно откачивают до давления около 10^{-4} Па. Затем подают ток накала на вольфрамовый термокатод, который разогревается до температуры возникновения термоэлектронного тока высокой плотности. Напряжение между раскаленным термокатодом и анодом равно 200 В, а давление аргона в рабочей камере - 10^{-2} Па. Электроны, испускаемые термокатодом, ионизируют молекулы аргона, которые после подачи отрицательного потенциала на катод-мишень (3-5 кВ), вытягиваясь из плазмы, бомбардируют и распыляют ее поверхность.

Особенностью триодных источников распыления является безынерционность (распыление после снятия потенциала с катода-мишени мгновенно прекращается), возможность ионной очистки поверхностей мишени и подложки без встраивания специальной системы электродов. Так как энергия летящих частиц очень велика, особенно при распылении тугоплавких материалов, сплавов и соединений, в разрядной камере и на мишени выделяется большое количество теплоты. Поэтому такие системы требуют охлаждения.

В магнетронных источниках (рис. 22), выполненных на основе диодных систем, в разрядном промежутке одновременно с электрическим действует магнитное поле, что позволяет без увеличения концентрации электронов повысить плотность плазмы. На электроны, эмиттированные автоэмиссионным катодом-мишенью 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 10^{-1} - 10^{-2} Па создается



высокая концентрация ионов газа, которые движутся к катоду-мишени, бомбардируя ее и распыляя с большой интенсивностью. Поток 1 распыляемого вещества устремляется к подложке и осаждается на ней в виде пленки.

Рис. 22. Схема магнетронного распыления:

1 - поток распыляемого вещества, 2 - кольцевой анод, 3 - катод-мишень, 4 - магнитная система

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

- низкое рабочее давление, позволяющее уменьшить количество газовых включений в осаждаемой пленке;
- высокая скорость нанесения пленки;
- надежность и стабильность параметров напылительной системы;
- широкий диапазон толщин пленок при их высокой адгезии однородности.

Ионно-термическое испарение является комбинацией термического испарения и ионного распыления и выполняется следующими методами:

- резистивным или электронно-лучевым испарением вещества с последующей ионизацией его паров в плазме рабочего газа;

- резистивным или электронно-лучевым испарением вещества с последующей ионизацией его паров (например, с помощью высокочастотного индуктора);
- высокочастотным термическим испарением вещества с одновременной высокочастотной ионизацией его паров.

Во всех случаях движение ионов испаряемого вещества к подложке и осаждение на ней обусловлены действием электрического поля, создаваемого между испарителем и подложкой. В зависимости от требуемой кристаллической структуры и адгезии осаждаемых пленок потенциал подложки может быть от 0 до 10^4 В. Так, при низких температурах подложки, чтобы получать удовлетворительную адгезию пленки к ней, потенциал необходимо увеличивать.

Достоинствами ионно-термического испарения являются:

- большая скорость процесса, свойственная термическому испарению, в сочетании с высокой энергией конденсирующих частиц, характерной для ионного распыления;
- однородность и равномерность осаждаемых пленок по толщине;
- возможность осаждения пленок сложного состава (карбидов, нитридов, оксидов и др.) с большими скоростями без высокотемпературного нагрева подложек.