

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

М. М. Филяк

## Конструктивно – технологические основы микроэлектроники

Рекомендовано Ученым советом Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по направлениям «Проектирование и технология электронных средств», «Электроника и наноэлектроника»

Оренбург

ИПК ГОУ ОГУ  
2011

УДК 621.3.049.77(07)  
ББК 32.844.1я7  
Ф57

Рецензент – профессор, доктор технических наук В. Н. Булатов

**Филяк, М.М.**

Ф Конструктивно-технологические основы микроэлектроники:  
учебное пособие / М. М. Филяк; Оренбургский гос. ун-т.–  
Оренбург: ОГУ, 2011. – 112 с.  
ISBN

В учебном пособии представлены общие сведения о технологии интегральных микросхем, дана их классификация и кратко описаны основные технологические операции. Основное внимание уделено технологии полупроводниковых микросхем. Рассмотрены также операции изготовления гибридных интегральных микросхем.

Учебное пособие предназначено для студентов направлений подготовки 210200 – Проектирование и технология электронных средств и 210100 – Электроника и микроэлектроника.

УДК 621.3.049.77(07)  
ББК 32.844.1я7

## Содержание

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>1 ПРЕДМЕТ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2 ОСОБЕННОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ.....</b>	<b>8</b>
<b>1.3 ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МИКРОСХЕМ.....</b>	<b>10</b>
<b>1.4 ЭТАПЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОСХЕМ.....</b>	<b>12</b>
<b>1.5 ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСХЕМ.....</b>	<b>14</b>
<b>1.6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....</b>	<b>17</b>
<b>2 КЛАССИФИКАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И ГИБРИДНЫЕ МИКРОСХЕМЫ.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 КЛАССИФИКАЦИЯ МИКРОСХЕМ ПО ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3 АНАЛОГОВЫЕ И ЦИФРОВЫЕ МИКРОСХЕМЫ.....</b>	<b>24</b>
<b>2.4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....</b>	<b>26</b>
<b>3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛАСТИН И ПОДЛОЖЕК.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.1 ТРЕБОВАНИЯ К ПЛАСТИНАМ И ПОДЛОЖКАМ.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.2 МАРШРУТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛАСТИН КРЕМНИЯ.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.3 МАРШРУТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.1 ТЕРМОВАКУУМНОЕ НАПЫЛЕНИЕ.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.2 РАСПЫЛЕНИЕ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКОЙ.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3 ТЕРМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4 ЭПИТАКСИАЛЬНОЕ НАРАЩИВАНИЕ.....</b>	<b>44</b>
<b>3.5 МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТОПОЛОГИИ МИКРОСХЕМ.....</b>	<b>48</b>
<b>3.5.1 ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССОВ ЛИТОГРАФИИ.....</b>	<b>48</b>
<b>3.5.2 ФОТОЛИТОГРАФИЯ.....</b>	<b>52</b>
<b>3.6 МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЕВ И ПЕРЕХОДОВ.....</b>	<b>59</b>
<b>3.6.1 ДИФФУЗИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ.....</b>	<b>59</b>

3.6.2 ИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ.....	68
3.7 ПРОЦЕССЫ ТРАВЛЕНИЯ.....	71
3.8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	74
4 ТИПОВЫЕ МАРШРУТЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТРУКТУР МИКРОСХЕМ.....	76
4.1 ИЗГОТОВЛЕНИЕ БИПОЛЯРНЫХ СТРУКТУР.....	76
4.2 ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОП-СТРУКТУР.....	79
4.3 ТЕХНОЛОГИЯ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ.....	82
4.3.1 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ГИС.....	82
4.3.2 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫХ ГИС.....	88
4.4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	92
5 СБОРКА МИКРОСХЕМ.....	93
5.1 РАЗДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИН И ПОДЛОЖЕК.....	93
5.2 МОНТАЖ КРИСТАЛЛОВ И ПЛАТ.....	96
5.3 ПРИСОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДНЫХ ВЫВОДОВ.....	100
5.4. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ МИКРОСХЕМ В КОРПУС.....	105
5.5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	110
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	112

## Введение

Электроника прошла несколько этапов развития, за время которых сменилось несколько поколений элементной базы: дискретная электроника электровакуумных приборов, дискретная электроника полупроводниковых приборов, интегральная электроника микросхем (микроэлектроника), интегральная электроника функциональных микроэлектронных устройств (функциональная микроэлектроника).

Элементная база электроники развивается непрерывно возрастающими темпами. Каждое из приведенных поколений, появившись в определенный момент времени, продолжает совершенствоваться в наиболее оправданных направлениях. Развитие изделий электроники от поколения к поколению идет в направлении их функционального усложнения, повышения надежности и срока службы, уменьшения габаритных размеров, массы, стоимости и потребляемой энергии, упрощения технологии и улучшения параметров электронной аппаратуры.

Одна из основных проблем, стоящих перед электроникой, связана с требованием улучшения технических параметров электронных систем с одновременным уменьшением их габаритов и потребляемой энергии. Современный этап развития электроники характеризуется широким применением интегральных микросхем. Это связано со значительным усложнением требований и задач, решаемых электронной аппаратурой, что привело к росту числа элементов в ней. Число элементов постоянно увеличивается. Разрабатываемые сейчас сложные системы содержат десятки миллионов элементов. В этих условиях исключительно важное значение приобретают проблемы повышения надежности аппаратуры и ее элементов, микроминиатюризация электронных компонентов и комплексной миниатюризации аппаратуры. Все эти проблемы успешно решает микроэлектроника.

Становление микроэлектроники как самостоятельной науки стало возможным благодаря использованию богатого опыта и базы промышленности, выпускающей дискретные полупроводниковые приборы. Однако по мере развития

полупроводниковой электроники выяснились серьезные ограничения применения электронных явлений и систем на их основе. Поэтому микроэлектроника продолжает продвигаться быстрыми темпами, как в направлении совершенствования полупроводниковой интегральной технологии, так и в направлении использования новых физических явлений.

Широкое распространение электронных устройств во всех отраслях народного хозяйства вызывает необходимость получения специалистами всех специальностей основ теоретических и практических знаний по существующей технологии разработки, изготовления и эксплуатации электронной аппаратуры.

Учебное пособие «Конструктивно – технологические основы микроэлектроники» базируется на лекционном курсе, который читается для студентов кафедры проектирования и технологии радиоэлектронных средств и кафедры промышленной электроники и информационно-измерительной техники Оренбургского государственного университета.

Учебное пособие по структуре и содержанию соответствует государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования по направлениям подготовки 210200 – Проектирование и технология электронных средств и 210100 – Электроника и нанoeлектроника.

Первая раздел посвящен основным понятиям и определениям. В этом разделе рассмотрены основные конструктивные элементы и этапы изготовления микросхем. Во втором разделе дана классификация микросхем по конструктивно – технологическим признакам, по функциональной сложности и функциональному назначению. Третий раздел посвящен основным технологическим операциям формирования структуры интегральных микросхем, а именно, окислению, эпитаксии, литографии, легированию, напылению тонких пленок и.т.д. В четвертом разделе описаны типовые маршруты изготовления полупроводниковых и гибридных микросхем. А так же приведены структуры базовых элементов биполярных, МОП, тонкопленочных и толстопленочных микросхем. В пятом разделе рассмотрены методы и основные операции сборки интегральных микросхем.

# 1 Предмет микроэлектроники

## 1.1 Общие сведения о микроэлектронике

Решение проблемы миниатюризации электронной аппаратуры связано с современным этапом развития электроники - микроэлектроникой. Микроэлектроника является одним из важнейших научных направлений, в значительной степени определяющих прогресс страны. С ней связан переход электронной аппаратуры (ЭА) на элементную базу третьего поколения. Основу приборов третьего поколения составляют интегральные микросхемы, содержащие большое количество активных и пассивных элементов. Первые разработки интегральных микросхем относятся к 1958-1960 гг. Современный этап развития микроэлектроники характеризуется быстро растущей степенью интеграции. Уже созданы интегральные микросхемы, содержащие многие тысячи элементов на одном кристалле с микронными и субмикронными размерами отдельных элементов

Электроника — это область науки, техники и производства, охватывающая исследование и разработку электронных приборов и принципов их использования.

Микроэлектроника – это раздел электроники, охватывающий исследование, конструирование, производство и применение качественно нового типа электронных приборов — интегральных микросхем — и принципов их применения.

Интегральная микросхема (или просто интегральная схема) есть совокупность, как правило, большого количества взаимосвязанных элементов (транзисторов, диодов, конденсаторов, резисторов и т.п.), изготовленная в едином технологическом цикле, на одной и той же несущей конструкции (подложке) и выполняющая определенную функцию преобразования, обработки сигналов и (или) накопления информации, которая с точки зрения требованиям к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации рассматривается как единое целое.

Основной отличительной чертой микроэлектроники является присущая ей интеграция: 1) технологическая (использование групповых методов изготовления), 2) конструктивная (объединение элементов на одной подложке).

Для изготовления интегральных схем используется групповой метод производства и планарная технология.

Групповой метод производства заключается в том, что, во-первых, на одной пластине полупроводникового материала одновременно изготавливается большое количество интегральных схем; во-вторых, если позволяет технологический процесс, то одновременно обрабатываются десятки таких пластин. Групповая технология, лежащая в основе производства ИС, позволяет снизить стоимость микроэлектронной аппаратуры по сравнению с аппаратурой на дискретных радиокомпонентах.

Планарная технология — это такая организация технологического процесса, когда все элементы и их составляющие создаются в интегральной схеме путем их формирования через плоскость (по-английски плоскость — plane).

Применение интегральных микросхем в качестве элементной базы электронной аппаратуры обеспечило значительное повышение быстродействия и надежности, сокращение габаритов и энергопотребления по сравнению с электронной аппаратурой второго поколения.

## **1.2 Особенности интегральных микросхем**

Поскольку ИМС, подобно транзистору, представляет собой конструктивное единое целое, выполняет определенную функцию и должна удовлетворять определенным требованиям при испытаниях, поставках и эксплуатации, она относится к разряду электронных приборов. Однако по сравнению с диодом, транзистором и т.п. ИМС является качественно новым типом прибора.

Первая — главная особенность ИМС как электронного прибора состоит в том, что она самостоятельно выполняет законченную, часто весьма сложную функцию, тогда как элементарные электронные приборы выполняют аналогичную функцию только в ансамбле с другими компонентами. Например, отдельный транзистор не может обеспечить усиление сигнала или запоминание информации. Для этого нужно из нескольких транзисторов, резисторов и других компонентов собрать

(спаять) соответствующую схему. В микроэлектронике же указанные функции выполняются одним прибором — интегральной схемой: она может быть усилителем, запоминающим устройством и т.п.

Второй важной особенностью ИМС является то, что повышение функциональной сложности этого прибора по сравнению с элементарными не сопровождается ухудшением какого-либо из основных показателей (надежность, стоимость и т.п.). Более того, все эти показатели улучшаются. Поскольку габариты и масса простых и средних ИМС близки к габаритам и массе дискретных транзисторов, то можно считать, что в первом приближении выигрыш по этим показателям при переходе от дискретных схем к интегральным определяется степенью интеграции и может достигать сотен и тысяч раз.

Поскольку надежность работы полупроводникового прибора в аппаратуре определяется, прежде всего, количеством паяных и (в меньшей степени) сварных соединений, то ИМС, у которых межсоединения элементов осуществляются путем металлизации (т.е. без пайки и сварки), обладают заведомо повышенной надежностью по сравнению с дискретными схемами.

Поскольку все элементы ИМС изготавливаются в едином технологическом цикле, то количество технологических операций по их изготовлению не намного превышает количество операций по изготовлению отдельного транзистора. Поэтому стоимость ИМС при прочих равных условиях близка к стоимости одного транзистора. Значит, в зависимости от плотности упаковки), стоимость одного элемента ИМС по сравнению со стоимостью аналогичного дискретного компонента может быть в сотни раз меньше.

Третья особенность ИМС состоит в предпочтительности активных элементов перед пассивными — принцип, диаметрально противоположный тому, который свойствен дискретной транзисторной технике. В последней активные компоненты, особенно транзисторы, наиболее дорогие, и потому оптимизация схемы при прочих равных условиях состоит в уменьшении количества активных компонентов. В ИМС дело обстоит иначе: у них задана стоимость не элемента, а кристалла; поэтому целесообразно размещать на кристалле как можно больше элементов с минимальной

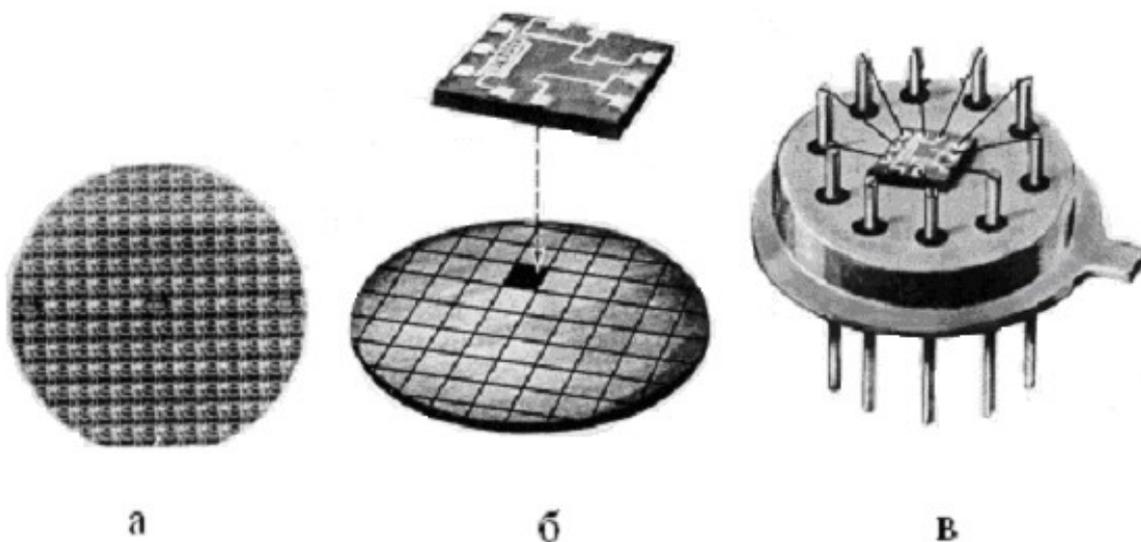
площадью. Минимальную площадь имеют активные элементы — транзисторы и диоды, а максимальную — пассивные. Следовательно, оптимальная ИМС — это ИМС, у которой сведены к минимуму количество и номиналы резисторов и, особенно, конденсаторов.

Четвертая особенность ИМС связана с тем, что смежные элементы расположены друг от друга на расстоянии, измеряемом в мкм или долях мкм. На таких малых расстояниях различие электрофизических свойств материала маловероятно, а, следовательно, маловероятен и значительный разброс параметров у смежных элементов. Иначе говоря, параметры смежных элементов взаимосвязаны — коррелированы. Эта корреляция сохраняется и при изменении температуры: у смежных элементов температурные коэффициенты параметров практически одинаковы. Корреляция между параметрами смежных элементов используется при проектировании некоторых ИМС с целью снизить влияние разброса параметров и изменений температуры.

Гибридные ИМС (ГИС) тоже представляют собой тип электронных приборов. Однако наличие навесных компонентов делает их менее специфичными, чем полупроводниковые ИМС. Остается в силе фундаментальная черта всякой ИМС — функциональная сложность прибора, что, как и при использовании полупроводниковых ИМС, качественно меняет структуру электронной аппаратуры. Спецификой ГИС как прибора могут быть либо высокие номиналы резисторов и конденсаторов, недостижимые в полупроводниковых ИМС, либо прецизионность резисторов, либо, наконец, повышенная функциональная сложность. ГИС — это гибкий, дешевый, оперативно проектируемый тип ИМС, хорошо приспособленный к решению специальных, частных задач.

### **1.3 Основные конструктивные элементы микросхем**

Любая интегральная микросхема состоит из структуры, внешнего корпуса и средств сборки, т. е. деталей, обеспечивающих соединения структуры с корпусом и с внешними электрическими выводами (рисунок 1.1).



а — кремниевая пластина со структурами; б — межсоединения элементов внутри структуры; в — структура в корпусе с проволочными выводами

Рисунок 1.1 – Основные конструктивные элементы ИМС

Структура является функциональной основой микросхемы. Она содержит все элементы (и компоненты или кристаллы), межэлементные соединения и контактные площадки. Выбор физической структуры микросхемы однозначно определяет ее основные электрические параметры. Таким образом, физическая структура ИМС является результатом конструктивно-технологической реализации схемотехнической функции.

Применять структуры для изготовления аппаратуры нельзя: они хрупки, практически невозможно выполнить монтаж структур и электрические подсоединения, на их параметры сильно влияют внешние воздействия.

Корпус предохраняет структуру от механических нагрузок и влияний окружающей среды при эксплуатации микросхемы, а также обеспечивает удобный и надежный монтаж микросхемы в аппаратуру. Эту роль может выполнять не только специально изготовленный корпус (корпусные микросхемы), а также герметизирующий состав, в который заключают структуры (бескорпусные микросхемы).

Средства сборки – это припойные прокладки, проволочные выводы, выводные рамки (ленты) и др. Они позволяют прочно укреплять структуры и подсоединять их контактные площадки к внешним электрическим выводам, служащим для включения микросхем в электронную аппаратуру.

В зависимости от внешнего конструктивного оформления различают корпусные, бескорпусные и комбинированные ИМС.

#### 1.4 Этапы изготовления микросхем

В технологии изготовления любой микросхемы можно выделить основные этапы (рисунок 1.2), общие для всех микросхем: изготовление и очистка пластин или подложек, формирование структур микросхем, сборка, испытания и измерения, заключительные операции.

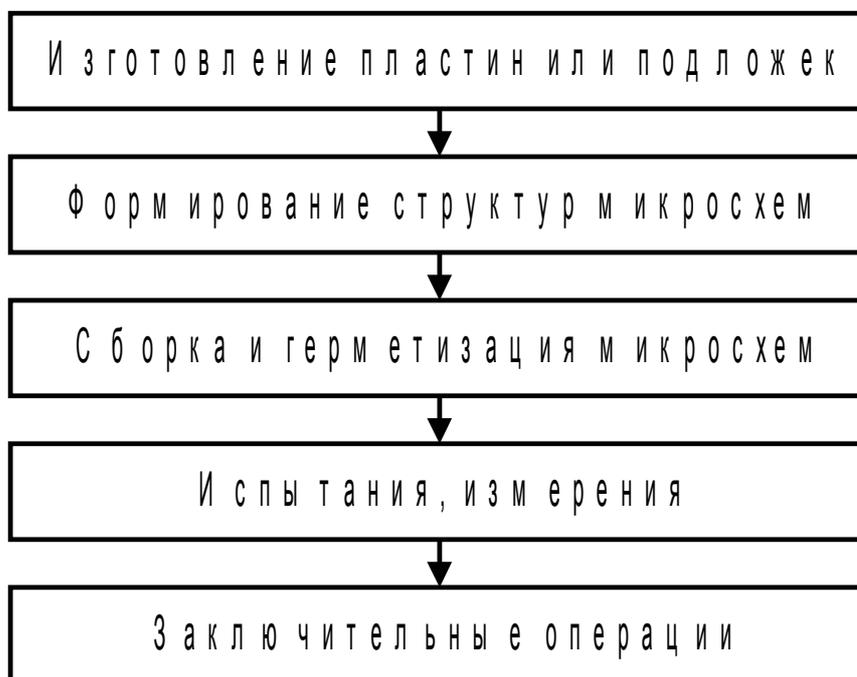


Рисунок 1.2 – Этапы изготовления микросхем

1.4.1 Изготовление пластин и подложек. Полупроводниковые пластины и диэлектрические подложки являются групповыми заготовками для изготовления структур микросхем.

В настоящее время для промышленного изготовления полупроводниковых микросхем применяют кремний (Si). Кроме кремния для полупроводниковых микросхем и навесных активных компонентов и кристаллов для микросхем применяют арсенид галлия (GaAs) и другие полупроводниковые соединения.

Для гибридных и пленочных микросхем применяют подложки из стекол, ситаллов, фотоситаллов, керамик. Применяют также гибкие полимерные подложки, в основном из полиимида, а также металлические подложки с диэлектрическим покрытием ( $Al-Al_2O_3$ ). Кроме этого, применяют монокристаллические диэлектрические подложки из сапфира.

Изготовление пластин и подложек включает: механическую обработку полупроводниковых или диэлектрических материалов и очистку поверхности полученных заготовок.

1.4.2 Формирование структур микросхем. Этот этап состоит в формировании элементов, межэлементных соединений и контактных площадок в соответствии с топологическими чертежами и вертикальными разрезами структур, т.е. в получении элементов заданной конфигурации, размеров, взаимного расположения в горизонтальной плоскости (поверхности) пластин или подложек и заданных размеров в вертикальном направлении (толщины пленок, глубины легирования). Технологические процессы изготовления структур: литография, травление, осаждение тонких пленок, легирования пластин и наращивания полупроводниковых слоев. Структуры микросхем изготавливают только групповым методом.

1.4.3 Сборка и герметизация микросхем. Общепринято под сборкой подразумевать завершающий процесс соединения деталей и сборочных единиц (узлов), в результате которого получается готовое изделие.

Для сборки корпусных ИМС изготавливают детали и узлы корпусов, в ряде случаев – дополнительную арматуру, например, выводные рамки, выводы на ленточных носителях и др.

Для сборки бескорпусных ИМ подготавливают герметизирующие составы и изготавливают арматуру для подсоединения структур.

1.4.4 Испытания и измерения. Для отбраковки ИМ, содержащих скрытые дефекты, после герметизации проводят технологические испытания и измерение параметров. Технологические испытания делятся на климатические, механические и электрические. При климатических испытаниях ИМ проверяют на термоциклирование, влаго-, тепло- и холодоустойчивость. С помощью механических испытаний на удар и вибропрочность проверяют механическую прочность конструкции и внутрисхемных соединений ИМС. В процессе электрических испытаний проводится токовая тренировка и проверка ИМС на стабильность, а также измерение параметров ИМС.

1.4.5 Заключительные операции. К заключительным операциям относятся окраска, лакировка, гальванические покрытия, маркировка, подготовка выводов для подсоединения в аппаратуру, упаковка.

## **1.5 Принципы формирования микросхем**

В отличие от традиционных электронных схем на дискретных элементах, проектирование которых практически мало зависит от дальнейшей технологии, для микросхем проектирование теснейшим образом связано с технологией их изготовления. Это объясняется тем, что ИМС представляют собой единое конструктивное целое большого числа элементов. Параметры каждого элемента и рабочие характеристики микросхем в целом определяются не только точностью топологии, но и выбором оптимальных материалов и технологии. Кроме этого, между элементами микросхем всегда существуют нежелательные взаимодействия и паразитные эффекты, которые также необходимо учитывать и сводить к минимуму.

При изготовлении структур микросхем руководствуются определенными принципами, которые обусловлены взаимосвязью проектирования конструкции ИМС и технологии их изготовления и в равной степени относятся к ним обоим.

Принцип совместимости элементов вытекает из конструктивного единства интегральных микросхем. Все элементы микросхемы выполнены на единой несущей конструкции – полужке. Для микросхем мы имеем дело не только с конструктивной, но и с технологической интеграцией. При которой в одном технологическом процессе одновременно изготавливаются различные элементы (например, транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы). Именно поэтому при выборе типов и конструкции элементов, входящих в состав микросхемы, необходимо оценить практическую возможность их совместного формирования в едином технологическом процессе.

Для практического осуществления принципа совместимости элементов за основу берут самый сложный элемент (транзистор). Технология изготовления микросхемы проектируется так, что попутно одновременно с транзисторами формируются все остальные элементы. Например, в биполярных микросхемах резисторы получаются одновременно с получением базовых областей транзисторов, конденсаторами могут являться обратносмещенные р-п – переходы. Нарушение принципа совместимости элементов приводит к технологической невозможности создания микросхемы или к необходимости введения в технологический процесс дополнительных операций.

Принцип локальности технологических обработок означает то, что при одновременном формировании множества активных и пассивных элементов и межэлементных соединений ИМС в большинстве процессов технологическому воздействию подвергается не вся поверхность, а лишь ее отдельные локальные участки. Форма, размеры и взаимное расположение этих участков на поверхности пластин (или подложек) соответствует топологическому чертежу для данной обработки (для данного топологического слоя).

Практическая реализация этого принципа осуществляется с помощью экранирования участков, которые не подлежат обработке, или с помощью локализации самих средств обработки.

В первом случае мы имеем дело с масочной технологией, во втором – с безмасочной (рисунок 1.3)



Рисунок 1.3 – Методы локализации технологических обработок при изготовлении структур ИМС

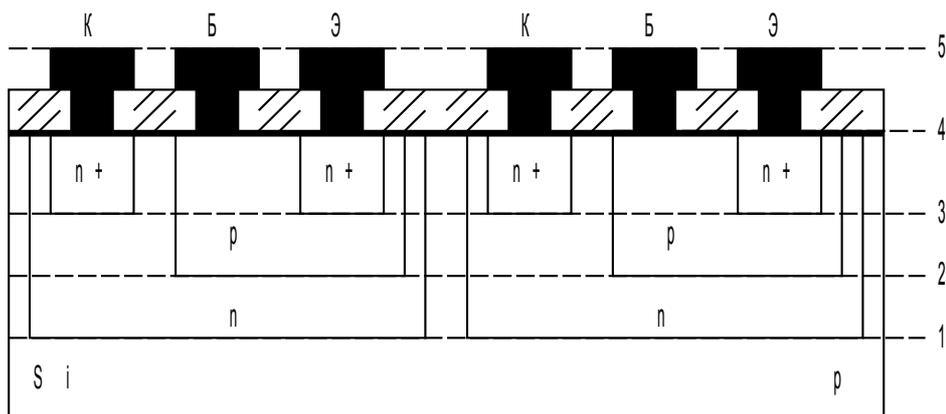
Масочная технология основана на экранировании нужных участков поверхности пластин (подложек) с помощью свободных или контактных масок. Свободные или, иначе, съемные маски применяются при формировании тонко- и толсто пленочных микросхем. В толсто пленочной технологии их по традиции обычно называют трафаретами.

Контактные маски – универсальны, их можно применять в процессах изготовления любых микросхем, прецизионных свободных масок, выводных рамок (лент) и др. Контактная маска изготавливается непосредственно на подложке или пластине и удерживается на ее поверхности силами адгезионного сцепления.

Локальная обработка без использования масок может выполняться острорасфокусированными электронным или ионным лучами, включением, выключением и перемещением которых по заданной программе управляют с помощью компьютера.

Принцип послойного формирования элементов микросхем (принцип послойности): при изготовлении структур микросхем локальные обработки выполняют многократно, т. е. элементы формируют постепенно как бы технологическими слоями. Например, при изготовлении биполярной ИМС, фрагмент структуры которой показан на рисунке 1.4, локальные обработки проводят пять раз. Число таких технологических обработок равно числу топологических

чертежей на данную ИМС. Послойно так же формируют тонкопленочные и толстопленочные структуры. Необходимым условием при соблюдении принципа послойности является точное совмещение каждого последующего технологического слоя с предыдущим. На практике это делают с помощью специальных знаков совмещения.



1 – первый технологический слой – формирование изолирующих переходов; 2 – второй технологический слой – формирование базовых областей; 3 – третий технологический слой – формирование переходов эмиттерных областей и приконтактных  $n^+$  – областей; 4 – четвертый технологический слой – формирование слоя контактов; 5 – пятый технологический слой – получение топологии проводящих дорожек и контактных площадок

Рисунок 1.4 – Фрагмент структуры ИМС на биполярных транзисторах:

## 1.6 Контрольные вопросы

1. Что такое интегральная микросхема?
2. Сформулируйте принципы формирования микросхем.
3. Перечислите основные технологические операции изготовления ИМС и объясните их назначение.
4. Назовите основные конструктивные элементы интегральных микросхем.

## 2 Классификация интегральных микросхем

Классификация микросхем может проводиться:

- по конструктивно – технологическому исполнению;
- по функциональной сложности;
- по функциональному назначению.

### 2.1 Полупроводниковые и гибридные микросхемы

По способу изготовления и получаемой при этом структуре (по конструктивно – технологическому исполнению) различают два принципиально разных класса микросхем: полупроводниковые и гибридные (рисунок 2.1).

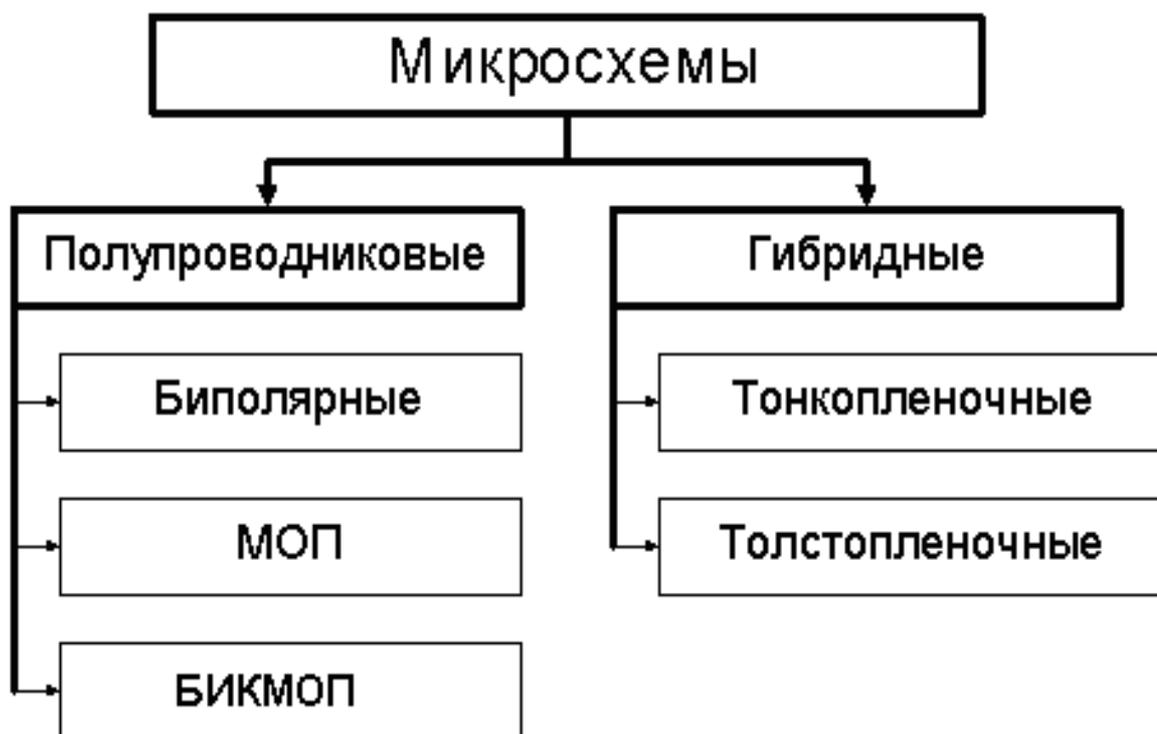


Рисунок – 2.1 Классификация микросхем по конструктивно-технологическому исполнению структур

Полупроводниковой интегральной микросхемой (ИПС) (рисунок 2.2) называют микросхему, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объеме и на поверхности полупроводниковой пластины, используя локальное введение различных примесей через специально сформированную на поверхности маску. Соединение элементов в соответствии с принципиальной схемой устройства осуществляется с помощью металлизации, сформированной на поверхность пластины.

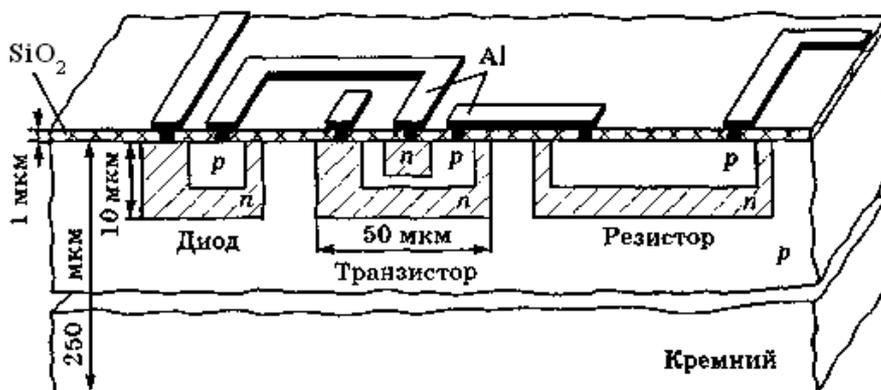


Рисунок 2.2 – Структура элементов полупроводниковой ИМС

Гибридная ИМС (или ГИС) — это микросхема (рисунок 2.3) в которой, пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, индуктивные элементы), а также электрические проводники и контактные площадки изготавливаются на поверхности диэлектрической подложки по пленочной технологии, а активные (бескорпусные транзисторы, диоды и так далее) размещаются на подложке с помощью навесного монтажа.

Дискретные компоненты, входящие в состав гибридной ИМС, называют навесными, подчеркивая этим их обособленность от основного технологического цикла получения пленочной части схемы.

В гибридных микросхемах используются как простые навесные компоненты, например, бескорпусные биполярные n-p-n-транзисторы, так и сложные, например, бескорпусные кристаллы полупроводниковых микросхем.

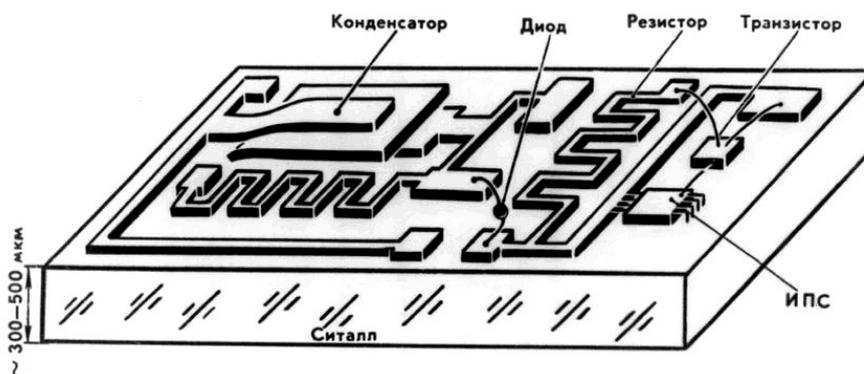


Рисунок 2.3 – Структура элементов гибридной ИМС

Иногда выделяют в отдельные группы пленочные и совмещенные интегральные микросхемы. Их доля в общем объеме производства невелика. Пленочные ИМС – это обычно наборы резисторов или конденсаторов с одинаковыми параметрами или параметрами, образующими геометрическую прогрессию ( $R$ ,  $2R$ ,  $4R$  и так далее). Совмещенная ИМС – это интегральная полупроводниковая микросхема, в которой активные элементы (транзисторы и диоды) формируются в приповерхностном слое полупроводниковой пластины, а пассивные элементы (резисторы, конденсаторы и так далее) – на ее поверхности по пленочной технологии.

Элемент ИМС – часть ИМС, реализующая функции какого-либо радиоэлемента, выполненная нераздельно от кристалла или подложки. Элемент не может быть отделен от ИМС как самостоятельное изделие.

Компонент ИМС – часть ИМС, реализующая функции какого-либо радиоэлемента, который, в отличие от элемента, может быть выделен как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

По типу применяемых активных элементов (транзисторов) полупроводниковые микросхемы разделяют на: биполярные, МОП (металл-окисел-полупроводник) и БИКМОП. Последние представляют собой сочетание первых двух, и в них комбинируются их положительные качества (рисунок 2.1).

Основным элементом биполярных ИМС является n-p-n -транзистор: на его изготовление ориентируется весь технологический цикл. Все другие элементы должны изготавливаться, по возможности, одновременно с этим транзистором, без дополнительных технологических операций.

Активные элементы БИП ИМС:

- p-p-p – и p-p-p – транзисторы.

Пассивные элементы БИП ИМС:

- диоды: переходы эмиттер – база, база – коллектор;
- резисторы: эмиттерные и базовые области;
- конденсаторы: обратно смещенные переходы эмиттер – база, база – коллектор.

Элементы биполярной ИС необходимо тем или иным способом изолировать друг от друга с тем, чтобы они не взаимодействовали через подложку. Поэтому в ИМС существуют дополнительные элементы – элементы изоляции (p-p – переход, диэлектрик).

Основным элементом МОП ИМС является МОП – транзистор. Изготовление других элементов также должно вписываться в технологию изготовления подстраивается базового транзистора.

Активные элементы МОП ИМС:

- n – канальные или p – канальные транзисторы.

Пассивные элементы МОП ИМС:

- диоды: переходы исток – подложка, сток – подложка;
- резисторы: стоковые и истоковые области;
- конденсаторы: МОП – структуры.

Характерная особенность полупроводниковых ИМС состоит в том, что среди их элементов отсутствуют катушки индуктивности и, тем более, трансформаторы. Это объясняется тем, что до сих пор не удалось использовать в твердом теле какое-либо физическое явление, эквивалентное электромагнитной индукции. Поэтому при разработке ИМС стараются реализовать необходимую функцию без использования

индуктивностей, что в большинстве случаев удается. Если же катушка индуктивности или трансформатор принципиально необходимы, их приходится использовать в виде навесных компонентов.

Гибридные ИМС в зависимости от технологии изготовления делятся на толсто- и тонкопленочные.

Толстопленочные ГИС (обозначим их ТсГИС) (толщина пленок 10 – 20 мкм) изготавливаются весьма просто. На диэлектрическую пластинку-подложку наносят пасты разного состава. Проводящие пасты обеспечивают межсоединения элементов, обкладки конденсаторов и выводы к штырькам корпуса; резистивные — получение резисторов; диэлектрические — изоляцию между обкладками конденсаторов и общую защиту поверхности готовой ГИС. Каждый слой должен иметь свою конфигурацию, свой рисунок. Поэтому при изготовлении каждого слоя пасту наносят через свою маску — трафарет — с окнами в тех местах, куда должна попасть паста данного слоя. После этого приклеивают навесные компоненты и соединяют их выводы с контактными площадками.

Тонкопленочные ГИС (обозначим их ТкГИС) (толщина пленок 1 – 2 мкм) изготавливаются по более сложной технологии, чем ТсГИС. Классическая тонкопленочная технология характерна тем, что пленки осаждаются на подложку из газовой фазы. Вырастив очередную пленку, меняют химический состав газа и тем самым электрофизические свойства следующей пленки. Таким образом, поочередно получают проводящие, резистивные и диэлектрические слои. Конфигурация (рисунок) каждого слоя определяется либо трафаретом, как в случае ТсГИС, либо маской, подобно окисной маске в полупроводниковых ИМС.

Навесные элементы в ТкГИС, как и в ТсГИС, приклеивают на поверхность готовой пленочной части схемы и соединяют с соответствующими контактными площадками элементов.

По объему производства полупроводниковые ИМС значительно превосходят гибридные. Это объясняется рядом преимуществ таких, как лучшие массо – габаритные показатели, стоимость, надежность и так далее. Тем не менее в данной технологии существует ряд ограничений, которые не позволяют реализовать любую

схему в полупроводниковом исполнении. Так например, схема содержит прецизионные резисторы, резисторы больших номиналов, или требуется сформировать конденсатор большой емкости. Гибридная технология в значительной степени свободна от этих ограничений.

## 2.2 Классификация микросхем по функциональной сложности

Размеры кристаллов современных ИМС достигают 20×20 мм. Чем больше кристалл, тем больше элементов можно на нем разместить, тем более сложную ИМС можно получить.

Функциональную сложность полупроводниковых ИМС принято характеризовать степенью интеграции, т.е. количеством элементов (чаще всего транзисторов) на кристалле. Повышение степени интеграции (а вместе с нею и сложности функций, выполняемых ИМС) — одна из главных тенденций в микроэлектронике.

Для количественной оценки степени интеграции используют условный коэффициент  $k$ .

$$k = \lg N, \quad (2.1)$$

где  $N$  — число элементов и компонентов, находящихся в кристалле и на поверхности ИМС. Показатель  $k$  округляется до ближайшего целого числа.

В зависимости от величины  $k$  различают:

- малые интегральные схемы (МИС) — это схемы 1 – степени интеграции ( $k < 2$ ,  $N < 100$ ), в состав которых входят один или несколько видов функциональных аналоговых или логических элементов (логические элементы И, ИЛИ, НЕ, триггеры, усилители, фильтры и т.д.);
- средние интегральные схемы (СИС) — схемы 2 – 3 степени интеграции ( $2 < k < 3$ ,  $N < 1000$ ), в состав которых входят один или несколько одинаковых функциональных узлов (регистр, счетчик, сумматор и т.д.);

– большие интегральные схемы (БИС) схемы 3 – 5 степени интеграции, в состав которых входят один или несколько функциональных устройств ( $3 < k < 5$ ,  $N < 10^5$ ) (арифметико – логическое устройство, оперативное запоминающие устройство и т.д.);

– сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) – это интегральные схемы выше 5 степени интеграции ( $k > 5$ ,  $N > 10^5$ ), представляющие собой законченные микроэлектронные изделия, способные выполнять функции аппаратуры (однокристальные ЭВМ, микропроцессоры).

Кроме степени интеграции, используют еще такой показатель, как плотность упаковки — количество элементов (чаще всего транзисторов) на единицу площади кристалла. Этот показатель, который характеризует главным образом уровень технологии, в настоящее время составляет 500-1000 элементов/мм<sup>2</sup>.

Степень интеграции ГИС не может оцениваться так же, как в случае полупроводниковых ИМС. Тем не менее, существует термин большая ГИС (или БГИС), который означает, что в состав ГИС в качестве навесных компонентов входят не отдельные транзисторы, а целые полупроводниковые ИМС. Классификация полупроводниковых микросхем по уровню интеграции представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Классификация полупроводниковых микросхем по уровню интеграции.

Уровень интеграции	Число элементов и компонентов в одной микросхеме		
	Цифровые микросхемы		Аналоговые микросхемы
	на МДП транзисторах	на биполярных транзисторах	
МИС	≤ 100	≤ 100	≤ 30
СИС	100...1000	100...500	30...100
БИС	1000...10 000	500...2000	100...300
СБИС	≥ 10 000	≥ 2000	≥ 300

### 2.3 Аналоговые и цифровые микросхемы

По функциональному назначению ИМС подразделяются на цифровые и аналоговые.

Если микросхема предназначена для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону дискретных функций, то она называется цифровой.

Цифровые микросхемы реализуются на основе базовых логических элементов. Логическими элементами (ЛЭ) называют электронные схемы, выполняющие простейшие логические операции над переменными, которые могут принимать только два дискретных значения «0» и «1». Простейшие логические операции НЕ-, И-, ИЛИ-. Кроме простейших используют и более сложные логические операции И-НЕ, ИЛИ-НЕ и т.д.

Первые серии цифровых микросхем выпускались на биполярных транзисторах, затем на МОП и КМОП транзисторах. Позднее начали выпускать сверхскоростные микросхемы на арсенид галлиевых полевых транзисторах.

В зависимости от используемого типа логических структур и конструктивно – технологических решений биполярные ИМС делят на: резисторно – транзисторную логику (РТЛ), диодно – транзисторную логику, транзисторно – транзисторную логику, в том числе с диодами Шоттки (ТТЛ и ТТЛШ), интегрально – инжекционную логику (И<sup>2</sup>Л), эмиттерно-связанную логику (ЭСЛ) и ее разновидности.

В свою очередь МОП ИМС, делятся на п – канальную логику, р – канальную логику и КМОП – логику.

Примеры цифровых микросхем: триггеры, счетчики, преобразователи кодов, дешифраторы, микропроцессы, мультиплексоры и т.д.

Аналоговые ИМС – это микросхемы выполняющие преобразование и обработку сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции. Аналоговые ИМС строятся на основе базовых элементарных каскадов. Например:

- усилители, обеспечивающие усиление напряжения и тока;
- повторители напряжения, усиливающие ток;
- повторители тока, усиливающие напряжение.

К аналоговым ИМС относятся усилители постоянного тока, дифференциальные усилители, операционные усилители, аналоговые коммутаторы и компараторы.

Аналогово-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП и АЦП) – это ИМС, которые объединяют в себе функции аналоговых и цифровых схем. Они осуществляют преобразование цифровых сигналов в аналоговые и наоборот.

## **2.4 Контрольные вопросы**

1. Дайте классификацию микросхем по конструктивно-технологическому исполнению структур.
2. Что такое гибридная микросхема?
3. Какую микросхему называют полупроводниковой микросхемой?
4. Какие вы знаете полупроводниковые интегральные микросхемы по типу используемых активных элементов?
5. Что такое степень интеграции?
6. Дайте классификацию микросхем по функциональной сложности.
7. Что такое плотность упаковки, характеристикой чего она является?
8. Как подразделяются ИМС по функциональному назначению?
9. Приведите примеры цифровых интегральных микросхем.
10. Какую микросхему называют аналоговой?
11. Приведите примеры аналоговых интегральных микросхем.

## **3 Технологические процессы микроэлектроники**

### **3.1 Изготовление пластин и подложек**

Полупроводниковые пластины и диэлектрические подложки являются групповыми заготовками для изготовления интегральных микросхем.

#### **3.1.1 Требования к пластинам и подложкам**

Технология современных микросхем предъявляет жесткие требования к групповым заготовкам под структуры микросхем – к полупроводниковым пластинам и диэлектрическим подложкам.

3.1.1.1 Требования к полупроводниковым пластинам. Эти требования относятся к электрофизическим характеристикам полупроводника, а также к геометрическим параметрам и качеству поверхности пластин.

Электрофизические характеристики монокристаллических пластин полупроводников:

- кристаллографическая ориентация;
- удельное сопротивление;
- тип проводимости.

Исходя из этого, на этапе проектирования выбирают необходимую кристаллографическую ориентацию и марку полупроводникового материала.

Основные геометрические параметры пластин:

- диаметр;
- толщина.

Диаметр пластин определяется размерами полупроводникового слитка. Стандартными диаметрами наиболее распространенных полупроводников (Si, Ge и т.д.) являются 76, 100, 200 мм. На пластинах большего диаметра можно изготовить большее количество кристаллов микросхем (таблица 3.1). Толщина пластин зависит от их диаметра.

Таблица 3.1 – Зависимость количества кристаллов от диаметра пластин

Размер кристалла, мм	Площадь кристалла, мм <sup>2</sup>	Количество кристаллов на пластине диаметром, мм; (толщиной, мкм)	
		76(450)	100(600)
1 x 1	1	4214	7598
2 x 2	4	1018	1846
4 x 4	16	236	434
6 x 6	36	95	184

Качество поверхности характеризуется глубиной механически нарушенного слоя, шероховатостью и качеством очистки от загрязнений.

Шероховатость поверхности пластин в большинстве случаев должна быть не ниже 13 – 14-го классов, что соответствует высоте микронеровностей от 0,100 до 0,025 мкм.

Качество очистки пластин оценивается: наличием механических и химически загрязнений. Под чистой поверхностью подразумевают технологически чистую поверхность, которая имеет концентрацию примесей, не препятствующую воспроизводимому получению заданных значений и стабильности параметров микросхем.

3.1.1.2 Требования к диэлектрическим подложкам. Подложки ГИС не являются составной частью элементов, они выполняют конструктивную роль поддерживающего пленочные и навесные элементы основания, а также служат для электрической изоляции элементов и межэлементных соединений.

Электрофизические характеристики диэлектрических подложек:

- высокое удельное сопротивление;
- низкие диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь;
- высокая электрическая, а также механическая прочность;
- высокая теплопроводность.

Необходимо, чтобы материал подложек был совместим с материалами наносимых пленок. Материалы считаются совместимыми, если в процессе технологических операций, при хранении и эксплуатации готовых микросхем они

не вступают в нежелательные взаимодействия друг с другом или с окружающей средой. Материал подложек должен быть стойким к технологическим обработкам, необходимым для изготовления структур микросхем.

В наибольшей степени основным требованиям отвечают подложки из стекла, ситаллов, керамики, полиимида.

Основные геометрические параметры – габаритные размеры диэлектрических подложек. Для большинства материалов они составляют 48×60 мм, при толщине от 0,5 до 1,6 мм. На эти размеры ориентировано технологическое оборудование и нормализованный ряд типоразмеров плат микросхем. Непараллельность сторон не превышает 0,05 мм.

Качество поверхности для тонкопленочных структур: допустимая высота микронеровностей меньше 25 нм, что соответствует 14-му классу шероховатости поверхности. Подложки для толстопленочных структур могут иметь микронеровности высотой до 2 мкм, т. е. класс шероховатости поверхности должен быть не ниже 8.

### 3.1.2 Маршрут изготовления пластин кремния

Перечислим укрупненные операции технологического процесса изготовления пластин кремния и отметим назначение некоторых из них.

1. Подготовка слитков к механической обработке и резка на пластины:

1.1. Калибровка слитка выполняется для придания слитку строго цилиндрической формы с диаметром, равным диаметру стандартных пластин;

1.2. Затем на специальном станке слиток разрезают на пластины нужной толщины.

2. Предварительная обработка пластин (шлифование). Шлифование пластин проводят для уменьшения разброса значений толщин, улучшения плоскостности и параллельности сторон, уменьшения шероховатости.

3. Окончательная обработка пластин (полирование). Полирование пластин выполняется для улучшения точности и качества обработки поверхности, для получения зеркально-гладкой поверхности с классом шероховатости 14 и выше.

4. Контроль пластин на соответствие геометрических, электрофизических параметров и качества поверхности установленным нормам.

5. Упаковка пластин в тару для хранения, транспортировки в цех изготовления структур микросхем.

### 3.1.3 Маршрут изготовления диэлектрических подложек

Рассмотрим основные операции технологического процесса изготовления диэлектрических подложек и их назначение.

1. Односторонне шлифование. Выполняется для получения заданной толщины и плоскостности.

2. Склеивание заготовок в пакет. Шлифование торцов заготовок выполняется для получения подложек заданных габаритных размеров с прямоугольным профилем периферии. Расклеивание пакета.

3. Шлифование и полирование подложек. Выполняется для доведения рабочей поверхности подложек до заданного класса шероховатости.

4. Контроль готовых подложек на соответствие геометрических (длина, ширина, толщина подложек, неперпендикулярность торцов) параметров, электрофизических параметров и требованиям к качеству поверхности (шероховатость).

5. Упаковка подложек.

## 3.2 Методы получения тонких пленок

Методы напыления тонких пленок широко применяется для:

- изготовления пленочных пассивных элементов при производстве ГИС (конденсаторов, резисторов);
- получения маскирующих пленок на полупроводниковых пластинах при производстве ИПС;
- осаждения полупроводниковых слоев при производстве ИПС;
- осаждение магнитных пленок при изготовлении изделий магнитоэлектроники;
- нанесение антикоррозийных покрытий на стальную ленту;
- производство металлической фольги;
- напыление в производстве оптического стекла с целью повышения коэффициента отражения во всём световом спектре.

### 3.2.1 Термовакuumное напыление

3.2.1.1 Основы метода. Метод основан на создании направленного потока пара вещества и последующей конденсации его на поверхностях подложек, имеющих температуру ниже температуры источника пара. Процесс термовакuumного напыления можно разбить на четыре этапа:

- 1) образование пара вещества;
- 2) распространение пара от источника к подложкам;
- 3) конденсации пара на подложках;
- 4) образование зародышей и рост пленки.

Образование пара вещества выполняется путем его испарения или сублимации. Чтобы увеличить интенсивность парообразования вещества нагревают. Приращения температуры на каждые 5 – 10% сверх температуры испарения приводят к увеличению скорости испарения на один порядок.

Распространение пара от источника к подложкам осуществляется путем диффузии и конвекции, на которые в первую очередь влияет степень вакуума.

Для повышения скорости напыления и получения более равномерной по толщине пленки необходимо обеспечить прямолинейное движение частиц пара в

направлении подложки. Это возможно при условии, если длина свободного пробега частиц пара будет больше расстояния источник – подложка.

Атомы пара, достигшие подложки могут:

- 1) мгновенно отразиться от нее (упругое столкновение);
- 2) адсорбироваться и через некоторое время отразиться от подложки (реиспарение);
- 3) адсорбироваться и после кратковременного мигрирования по поверхности окончательно остаться на ней (конденсация).

Конденсация атомов происходит, если их энергия связи с атомами подложки больше средней энергии атомов подложки.

Конденсация пара на поверхности подложки зависит от температуры подложки и плотности атомарного потока.

Если подложка нагрета, энергия ее атомов выше, вероятность конденсации пара ниже. Температура, выше которой при данной плотности потока пара все атомы отражаются от подложки и пленка не образуется, называется критической температурой конденсации.

Критической плотностью атомарного потока для данной температуры подложки называется наименьшая плотность, при которой атомы конденсируются на подложке.

Образование зародышей происходит в результате нахождения атомами мест, соответствующих минимуму свободной энергии системы атом – подложка.

По мере конденсации пара зародыши растут, между ними образуются соединяющие мостики, зародыши сливаются в крупные островки. После этого наступает стадия слияния островков с образованием единой сетки. Сетка переходит в сплошную пленку, которая начинает расти в толщину.

Качество пленки определяется:

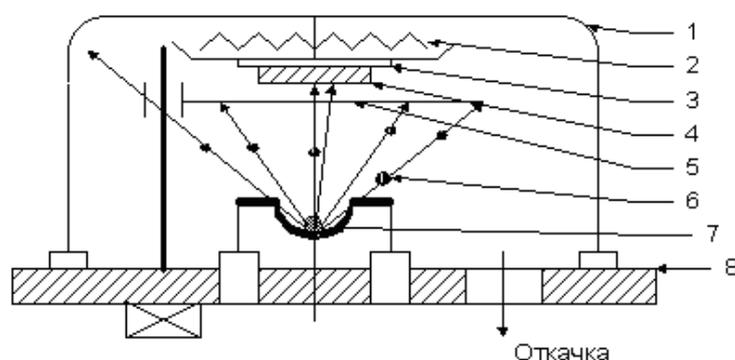
- размером зерна;
- равномерностью пленки по толщине;
- величиной адгезии к поверхности подложки.

Качество пленки зависит от:

- температуры испарителя и подложки,
- плотности атомарного потока,
- материала пленки и подложки.

3.2.1.2 Техника термовакuumного напыления (ТВН). Процесс ТВН выполняют в вакуумных камерах с предельным давлением от  $1,3 \cdot 10^{-4}$  до  $6,6 \cdot 10^{-5}$  Па. Нагрев вещества осуществляют путем пропускания электрического тока, токами индукции, электронной бомбардировкой.

Схема ТВН приведена на рисунке 3.1.



1 – вакуумная камера; 2 – нагреватель подложки; 3 – держатель подложки; 4 – подложка; 5 – заслонка; 6 – частицы испаряемого вещества; 7 – испаритель с навеской материала пленки; 8 – опорная плита

Рисунок 3.1 – Схема процесса термовакuumного напыления

Процесс ТВН включает в себя выполнение следующих действий:

- 1) загрузка вакуумной камеры: испаряемый материал помещают в тигли, подложки устанавливают в подложкодержатели, маски – в маскодержатели;
- 2) герметизация камеры и откачка воздуха;
- 3) нагрев подложек до заданной температуры и испарителей до температуры испарения при закрытой заслонке;
- 4) откачка камеры до предельного вакуума;
- 5) напыление пленки при открытой заслонке;

б) перекрытие атомарного потока заслонкой при получении заданной толщины пленки;

7) охлаждение подложек, выгрузка вакуумной камеры.

Достоинства метода:

– с помощью ТВН можно получать пленки металлов, полупроводников, диэлектриков;

– процесс обеспечивает высокие скорости роста пленок и степень чистоты, получение качественных пленок при сравнительно низких температурах подложек;

– процесса ТВН сравнительно легко автоматизируется.

Недостатки метода:

– изменение процентного соотношения компонентов при напылении сплавов и сложных веществ;

– недостаточная равномерность толщины пленок на больших подложках;

– трудность получения пленок тугоплавких материалов;

– высокая инерционность процесса (после выключения нагрева испарителей парообразование продолжается, поэтому процесс напыления пленки прекращается с помощью механической заслонки);

– сравнительно невысокая адгезия пленок;

– длительность процесса откачки по сравнению с напылением пленки.

### 3.2.2 Распыление ионной бомбардировкой

3.2.2.1 Основы метода. Осаждение пленок осуществляют распылением материала в плазме газового разряда.

Образование потока частиц происходит в результате бомбардировки поверхности мишени ионами аргона, ускоренными до энергий, достаточных для распыления. Материал распыляется в виде нейтральных атомов или молекул.

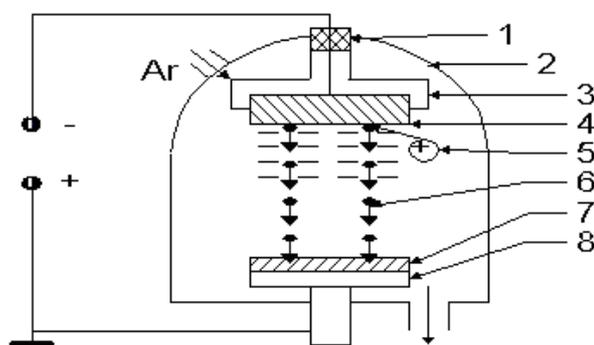
Распространение частиц происходит в плазме газового разряда. Наряду с частицами распыленного вещества на подложки попадают также молекулы и ионы остаточных газов.

Конденсация, образование зародышей и рост пленки при ионном распылении существенно отличается от этих этапов при ТВН:

- пленки осаждаются при любых плотностях потока и в широком температурном интервале подложки, т.е. при ионном распылении для конденсации не существует критической температуры подложки и критической плотности потока распыленного вещества;
- осаждаемые ионным распылением пленки становятся сплошными при меньших толщинах, чем пленки, полученные ТВН;
- скорости осаждения пленок, как правило, ниже, чем при ТВН.

Различают катодное (физическое и реактивное) и ионно-плазменное распыление.

3.2.2.2 Техника физического катодного распыления. Нанесение пленок этим методом выполняют в вакуумных камерах диодного типа в плазме тлеющего разряда аргона (рисунок 3.2). Подложки располагают на аноде, а катод является источником материала для образования пленки.



1 – изолятор; 2 – вакуумная камера; 3 – экран; 4 – катод-мишень; 5 – ион аргона, бомбардирующий катод; 6 – частицы распыленного катода; 7 – подложка; 8 – анод

Рисунок 3.2 – Схема процесса получения пленок катодным распылением

Процесс получения пленок катодным распылением включает следующие основные операции:

- 1) загрузка подложек и откачка камеры до давления от  $1 \cdot 10^{-3}$  до  $1 \cdot 10^{-4}$  Па;

- 2) напускают аргон до давления от 1,3 до 13 Па;
- 3) на катод-мишень подают отрицательный потенциал от 1,5 до 4 кВ относительно заземленного анода в камере зажигается тлеющий разряд. Ионы аргона, попавшие в область катодного пространства, бомбардируют катод, начинается его распыление. Поток частиц осаждается на поверхности подложек;
- 4) прекращение процесса отключением напряжения катод – анод;
- 5) выгрузка подложек.

Достоинства метода:

- 1) низкие температуры подложек в процессе нанесения;
- 2) большая, чем при термовакуумном напылении, равномерность пленок по площади подложек;
- 3) безинерционность процесса (распыление начинается при подаче на электроды напряжения и мгновенно прекращается при его снятии);
- 4) неизменяемость стехиометрии состава пленки по сравнению с составом катода;
- 5) высокая адгезия пленок к подложкам.

Недостатки метода:

- 1) сравнительно невысокие скорости осаждения;
- 2) загрязненность пленок молекулами остаточных газов;
- 3) более сложное управление техпроцессом по сравнению с термовакуумным напылением.

3.2.2.3 Реактивное катодное распыление. В отличие от обычного физического реактивное катодное распыление осуществляется в тлеющем разряде смеси инертного и активного газов.

Вводя в камеру различные активные газы, можно получать пленки разнообразных соединений, которые практически невозможно получить при термовакуумном напылении.

Для получения пленок оксидов распыление производят в плазме аргон - кислород, нитридов - в плазме аргон - азот, карбидов - в плазме аргон - угарный газ или аргон – метан, ферритовые магнитные пленки получают при распылении сплава

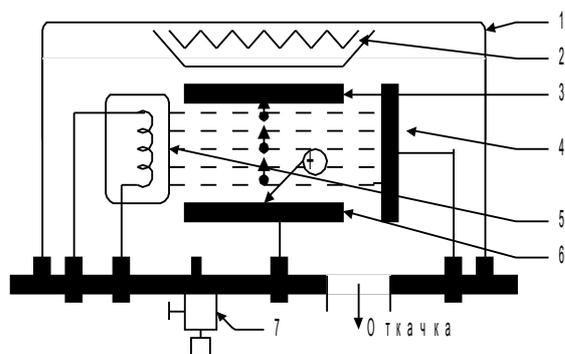
никеля с железом в плазме тлеющего разряда аргон – кислород; пленки силицида молибдена получают распылением молибденовой мишени в плазме Ar+SiH<sub>4</sub>.

Реактивное катодное распыление позволяет не только получать разнообразные по составу пленки, но и контролируемо управлять свойствами пленок, например, удельным сопротивлением резистивных пленок. Так, при распылении танталового катода в плазме аргон – азот получают тонкие пленки TaN, сопротивление которых можно изменять концентрацией вводимого в камеру азота. Реактивное распыление широко применяется для формирования высокоомных резисторов.

Основная техническая трудность при реактивном катодном распылении – точное дозирование вводимого в камеру активного газа.

3.2.2.4 Ионно – плазменное распыление. Осуществляется при более низких давлениях  $10^{-2}$  Па в плазме несамостоятельного дугового разряда. Пленки получают в трех– или четырех – электродных вакуумных камерах (рисунок 3.3).

Термоэмиссионный катод служит для поддержания дугового разряда. Источником частиц материала наносимой пленки является дополнительный катод – мишень.



1 – вакуумная камера; 2 – нагреватель; 3 – подложка; 4 – анод; 5 – катод; 6 – мишень; 7 – игольчатый натекатель

Рисунок 3.3 – Схема процесса ионно – плазменного распыления

Основные операции процесса ионно – плазменного распыления:

- 1) откачивают воздух из камеры до предельного вакуума;

2) включают ток накала катода, после разогрева катода между ним и анодом прикладывают напряжение, и в камеру впускают инертный газ. Между анодом и катодом зажигается дуговой разряд;

3) на мишень подается отрицательный по отношению к аноду потенциал 200 – 1000 В;

4) Электрическое поле мишени вытягивает из плазмы положительные ионы и ускоряет их до энергий в сотни электронвольт. Начинается распыление и формирование пленки на подложках;

5) отключают напряжение, выгружают подложки.

Достоинства метода:

1) меньше загрязнения пленок молекулами остаточных и инертных газов;

2) скорость осаждения пленок больше;

3) процесс осаждения легче управляем, толщина пленки регулируется потенциалом мишени и временем;

4) процесс отвечает требованиям автоматизации.

Недостатки метода:

1) малый срок службы термокатода;

2) термокатод является дополнительным источником загрязнений;

3) сравнительная сложность устройства и эксплуатации оборудования.

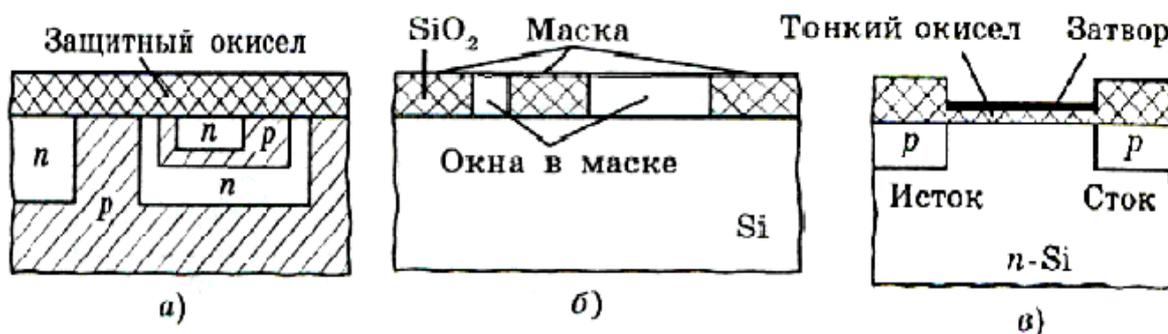
### **3.3 Термическое окисление**

3.3.1 Основы метода. Процесс окисления кремния, интенсифицируемый нагревом до высоких температур, принято называть термическим окислением.

Диоксид кремния  $\text{SiO}_2$  — диэлектрик универсального применения. В нем удачно сочетаются высокая химическая стойкость в окислительной среде, склонность к стеклообразованию, способствующая формированию беспористых плёнок, удовлетворительные электрофизические свойства.

Получаемая при этом пленка двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ) выполняет несколько важных функций, в том числе:

- функцию защиты — пассивации поверхности и, в частности, защиты вертикальных участков р-п – переходов, выходящих на поверхность (рисунок 3.4, а);
- функцию маски, через окна которой вводятся необходимые примеси (рисунок 3.4, б);
- функцию тонкого диэлектрика под затвором МОП – транзистора (рисунок 3.4, в).



а — пассивация поверхности; б — маска для локального легирования; в — тонкий подзатворный окисел

Рисунок 3.4 – Функции пленки двуокиси кремния

Кремний обладает большим сродством к кислороду. На тщательно очищенной поверхности кремния уже при комнатной температуре образуется пленка диоксида кремния толщиной 1,0 – 1,5 нм, поэтому термическое оксидирование в любом случае ведется при наличии на поверхности тонкой оксидной пленки.

Кинетика процесса окисления описывается моделью Дила – Гроува. Процесс термического окисления происходит в три стадии:

- адсорбция окисляющих веществ на поверхности кремния (или окисла);
- диффузия окисляющих веществ через окисный слой;
- реакция этих веществ с кремнием на границе раздела кремний — оксид кремния.

Общий характер процесса термического оксидирования кремния может быть представлен кинетической кривой  $d = F(t)$  (при  $T = \text{const}$ ), где  $d$  — толщина пленки оксида;  $t$  — время,  $T$  — температура окисления (рисунок 3.5).

Условно кривая может быть разбита на четыре участка.

Участок I, соответствующий начальному периоду окисления, описывается линейной функцией. Скорость роста пленки на этом этапе процесса постоянна и определяется скоростью адсорбции окислителя на поверхности кремния. По мере роста пленки все большую роль начинает играть диффузия окислителя через окисную пленку к границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>.

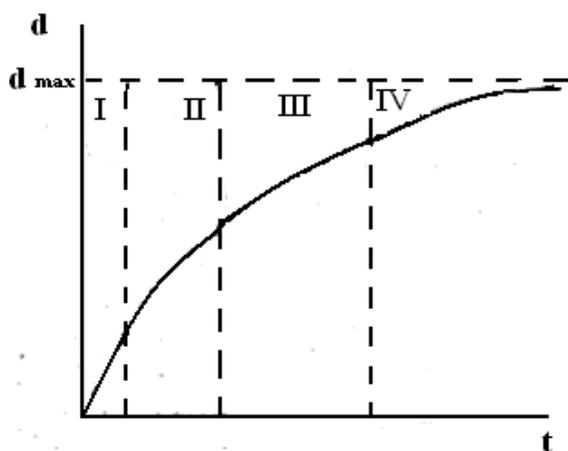


Рисунок 3.5 – Кинетическая кривая окисления

На участке II линейная зависимость сменяется линейно – параболической, которая определяется конкуренцией поверхностной реакции и диффузии.

Преимущественно диффузионный этап процесса оксидирования осуществляется на участке III, для которого кинетическая кривая отражается параболическим законом вытекающий из линейно – параболического, что отвечает случаю отсутствия вклада в кинетику процесса поверхностной реакции. При дальнейшем росте пленки диффузия окислителя через слой оксида затрудняется, и скорость роста начинает убывать заметнее, чем на предыдущих участках.

На участке IV кинетическая кривая приближается к некоторому предельному значению  $d_{\max}$ , характерному для данной температуры, и параболический закон сменяется параболически – логарифмическим, а затем логарифмическим законом.

Таким образом, термическое окисление кремния в технологически приемлемых интервалах температуры и времени приводит к образованию пленок предельной толщины. Так, при температуре порядка 1200 °C невозможно получить термический окисел на кремнии толщиной более 1,5 мкм.

Все перечисленные зависимости (кроме чисто логарифмической) можно объединить степенной функцией. Вследствие этого, формула, связывающая толщину окисной пленки со временем термического окисления, имеет вид:

$$d = kt^n \quad (3.1)$$

где  $d$  – толщина окисла;

$k$  — параметр, зависящий от температуры и влажности кислорода;

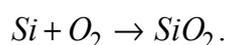
$t$  – время окисления.

Различают низкотемпературное (400 – 900 °C) и высокотемпературное (1000 – 1250 °C) окисление.

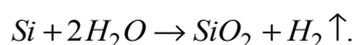
При низких температурах коэффициенты диффузии частиц окислителя ниже и, следовательно, скорость роста пленки меньше. Повысить скорость роста можно повышением температуры процесса. С уменьшением температуры на каждые 100 °C время окисления возрастает в 2 – 3 раза.

Окисление можно проводить в атмосфере кислорода (сухое окисление) и в смеси кислорода с парами воды (влажное окисление).

При использовании сухого кислорода на поверхности кремния идет реакция:



При использовании влажного кислорода идет еще дополнительная реакция:



При одной и той же температуре коэффициент диффузии воды в диоксиде кремния существенно больше коэффициента диффузии кислорода. Этим объясняются высокие скорости роста оксида во влажном кислороде. Например, для выращивания пленки  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,5 мкм в сухом кислороде при 1000 °С требуется около 5 часов, а во влажном – всего 20 мин.

Качество окисной пленки (наличие трещин, отверстий, пор) тем выше, чем меньше скорость роста пленки. И, следовательно, при низкотемпературном окислении качество окисной пленки выше. Качество окисла так же повышается при использовании сухого кислорода.

Следует также отметить экспериментально доказанную аддитивность общего процесса окисления, т.е. возможность применения комбинаций методов термического окисления в различных средах и использование прерываний процесса окисления, поскольку предыдущее окисление не влияет на последующее так же, как и перерыв в окислении. Таким образом, при выращивании толстого окисла чередуют сухое и влажное окисление: первое обеспечивает отсутствие дефектов, а второе позволяет сократить время процесса.

На образование пленки расходуются атомы кремния, поэтому исходная поверхность подложки в процессе оксидирования уходит в толщу оксида (рисунок 3.6). Это явление называется прокисление. Именно прокислением кремния объясняется высокая адгезия пленки оксида к кремнию.

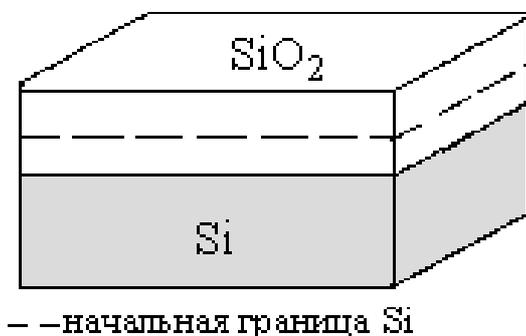


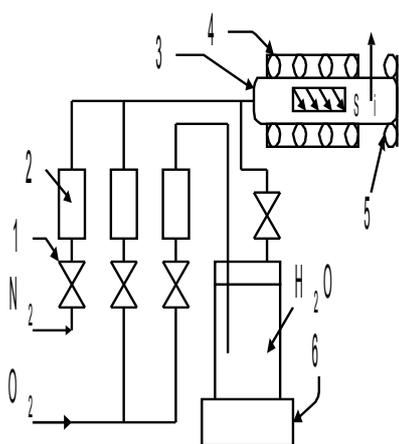
Рисунок 3.6 – Термическое окисление кремния

Метод термического окисления не лишен и некоторых недостатков.

Так, при создании толстых (2 – 3 мкм) изолирующих пленок (при изготовлении интегральной схемы с диэлектрической изоляцией) этот метод неприемлем, во-первых, поскольку уже при толщине окисла порядка 1,5 мкм скорость его роста пренебрежимо мала, а во-вторых, при толщине более 2 мкм в пленках SiO<sub>2</sub> образуются трещины из-за высоких внутренних напряжений.

Метод термического окисления невозможно применить при пассивации готовых структур из-за температурных ограничений (не более 300 °С при применении алюминиевой разводки).

3.3.2 Техника процесса. Для термического окисления применяют метод проточной трубы (рисунок 3.7), т.е. через кварцевую трубу-камеру непрерывно проходит сухой или влажный кислород. Для обеспечения подачи в камеру паров воды испарение используют герметичный сосуд-дозатор (барботер). Сухой кислород проходит сквозь воду, захватывая пары воды. Такой дозатор барботажного типа нагревают до температуры 60 – 95 °С. Подготовленные к процессу пластины кремния помещают вертикально в пазы кварцевой кассеты – лодочки. Камера установки из дважды переплавленного в вакууме кварца проходит через муфель печи с резистивными нагревателями.



1 – вентили; 2 – ротаметры; 3 – кварцевая труба – реактор; 4 – нагревательная печь; 5 – водоохлаждаемая заглушка; 6 – барботер

Рисунок 3.7 – Схема процесса термического окисления кремния

Основные операции процесса термического окисления:

- продувка камеры азотом;
- нагрев рабочей зоны до предварительной температуры, которая на 100 – 150 °С ниже заданной по технологии рабочей температуры;
- загрузка лодочки с пластинами в рабочую зону;
- нагрев печи до рабочей температуры;
- подача парогазовой смеси;
- выдержка пластин в течение заданного времени;
- охлаждение печи;
- выгрузка пластин.

В технологии ИМС различают толстые и тонкие окислы. Толстые окислы ( $d=0,5 - 0,8$  мкм) выполняют роль защиты и маскирования, а тонкие – функции подзатворного диэлектрика в МОП – транзисторах ( $d=0,05 - 0,15$  мкм).

### 3.4 Эпитаксиальное наращивание

3.4.1 Общие сведения. Эпитаксия – процесс наращивания монокристаллических слоев на монокристаллических подложках. Монокристаллические подложки в процессе роста эпитаксиального слоя выполняют ориентирующую роль затравки, на которой происходит кристаллизация (рисунок 3.8).

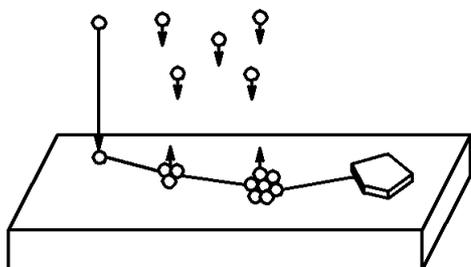


Рисунок 3.8 – Схема осаднения атомов и образования ориентированных зародышей

К основным преимуществам эпитаксиальной технологии можно отнести следующие преимущества.

- сравнительно низкая температура процесса эпитаксиального наращивания;
- возможность легирования монокристаллических пленок непосредственно в процессе их выращивания;
- возможность получения высокоомных слоев полупроводника на низкоомных пластинах.

В зависимости от состава материалов слоя и подложки различают процессы гомоэпитаксии и гетероэпитаксии.

1) Если составы материалов практически одинаковы, например слой кремния на кремниевой пластине, процесс называют гомоэпитаксией.

Гомоэпитаксией можно получить однородные по составу (гомогенные) электронно-дырочные переходы.

2) Гетероэпитаксия – процесс ориентированного нарастания вещества, отличающегося по химическому составу от вещества подложки.

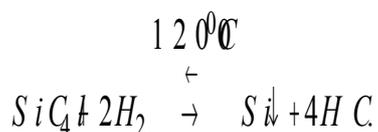
При наращивании гетероэпитаксиальных слоев на границе слой - подложка образуется неоднородный по составу (гетерогенный) переход.

Процесс гетероэпитаксии возможен для элементов и сложных веществ, не образующих между собой химических соединений.

Толщина эпитаксиальных слоев составляет от 0,1 – 100 мкм.

3.4.2 Гомоэпитаксия. Для осаждения слоев кремния используют кремнийсодержащие соединения: тетрахлорид кремния, силан. В соответствии с применяемыми исходными продуктами называют и методы: хлоридный и силановый.

Хлоридный метод основан на восстановлении тетрахлорида кремния водородом:

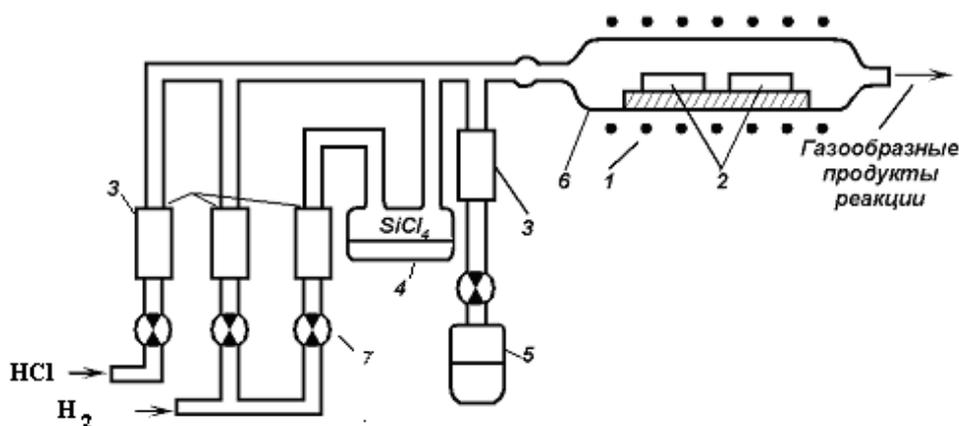


Процесс наращивания слоев кремния выполняют способом проточной трубы при атмосферном давлении (рисунок 3.9).

Парогазовая смесь поступает в зону реакции через множество кварцевых трубок. Нагрев подложкодержателя осуществляется резистивным, индукционным или ИК-способом.

Если добавить к тетрахлоиду кремния соединения фосфора или бора, то можно вырастить пленку нужного типа электропроводности и нужного удельного сопротивления.

Участвующий в реакции восстановления водород является одновременно и газом-носителем.



1 – нагреватель; 2 – подложки; 3 – ротаметры; 4 – испаритель; 5 – источник легирующей примеси; 6 – кварцевая труба; 7 – вентили

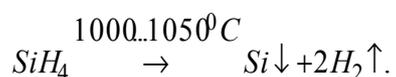
Рисунок 3.9 – Схема установки эпитаксиального наращивания

Процесс эпитаксиального осаждения включает переходы:

- загрузка пластин в гнезда подложкодержателя;
- нагрев пластин до температуры 1200 °С;
- осаждение эпитаксиального слоя, для чего в камеру подают пары тетрахлоида кремния и легирующее соединение
- охлаждение пластин;
- выгрузка эпитаксиальных структур.

Основной недостаток хлоридного метода - высокие температуры процесса, приводящие к диффузии примесей из пластин в растущий слой.

Силановый метод основан на использовании необратимой реакции термического разложения силана:



Установка для выращивания эпитаксиальных слоев силановым методом близка по устройству к установке, используемой в хлоридном методе.

3.4.3 Гетероэпитаксия. Гетероэпитаксия развивается в двух основных направлениях: выращивание полупроводниковых гетеропереходов и наращивание полупроводниковых слоев на диэлектрических подложках.

Наращивание гетеропереходов применяют для создания выпрямителей, работающих на основных носителях (CdSe - Se), туннельных диодов (GaAs - InP, CdS - ZnTe, GaAs - Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As), транзисторов с широкозонным эмиттером (GaAs - Ge), инжекционных лазеров (GaAs - Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As), источников спонтанного излучения (GaAs - GaP, CdSe - ZnTe, GaAs - InAs) и соответствующих микросхем.

Гетероэпитаксия на диэлектрических подложках при изготовлении микросхем решает проблему изоляции элементов.

В настоящее время наиболее освоена производством эпитаксия кремния на сапфировых подложках (КНС), а также ведутся исследования процессов наращивания кремниевых слоев на других изоляторах (КНИ).

Процесс гетероэпитаксии проводят аналогично гомоэпитаксии хлоридным или силановым методом. В последнее время широко применяется молекулярно-лучевая эпитаксия, которая близка процессам напыления.

Использование эпитаксиальных пленок в электронной промышленности позволило существенно улучшить характеристики туннельных и лазерных диодов, разработать технологию получения транзисторов с высоким коэффициентом усиления на высоких частотах, мощных и высоковольтных транзисторов.

На применении эпитаксиальных слоев основано производство таких приборов, как планарные полевые транзисторы, выполненные на структуре металл–окисел–полупроводник с изоляцией  $V$  – образными канавками ( $V$  – МОП). Эпитаксиальные структуры также используются для улучшения характеристик памяти с произвольным доступом и комплементарных интегральных МОП – микросхем.

Новые перспективы в технике открыло применение эпитаксиальных гетероструктур, создание которых другими методами затруднено, в полупроводниковых приборах (например, для изготовления инжекционных лазеров). Кроме того, эпитаксия дает возможность получения многослойных структур со свойствами каждого слоя, практически не зависящими от свойств предыдущего слоя. Это открывает широкие возможности для разработки качественно новых типов электронных приборов.

### **3.5 Методы формирования топологии микросхем**

#### **3.5.1 Характеристика процессов литографии**

3.5.1.1 Общие сведения. Самый универсальный технологический процесс в производстве современных микросхем – литография. Она позволяет воспроизводимо и с большой точностью выполнять сложные рисунки с размерами элементов до одного и менее микрометра в разнообразных материалах.

Внедрение литографии в полупроводниковое производство в 1957 г. определило дальнейшее развитие элементной базы электроники и позволило перейти от дискретных элементов к интегральным. В настоящее время области применения литографии существенно расширились.

Литография применяется:

- при изготовлении полупроводниковых и пленочных структур;
- для получения всевозможных канавок и углублений в полупроводниковых и других материалах;

- для изготовления шаблонов – инструменты для проведения самого процесса литографии;
- для получения сквозных отверстий в фольге при изготовлении прецизионных свободных масок, выводных рамок или лент;
- для разделения пластин или подложек с готовыми структурами на отдельные кристаллы или платы;
- для изготовления прецизионных деталей, точных шкал и т. д.

Основное назначение литографии при изготовлении структур микросхем – получение на поверхности пластин (или подложек) контактных масок с окнами, соответствующими топологии формируемых технологических слоев, и дальнейшая передача топологии (рисунка) с маски на материал данного слоя.

Сущность процессов литографии. Литография представляет собой сложный технологический процесс, основанный на использовании явлений, происходящих в актинорезистах при актиничном облучении.

Актинорезисты (или просто резисты) – материалы, чувствительные к излучению определенной длины волны (к актиничному излучению), и стойкие (резист - сопротивляться) к технологическим воздействиям, применяемым в процессе литографии.

Актиничное излучение — излучение, энергия кванта которого, вызывает фотохимические реакции и изменение физических и химических свойств облученных областей.

Локальное облучение (экспонирование) – воздействие излучением определенной длины волны. Оно осуществляется либо теневым способом, т. е. экранированием нужных участков непрозрачными для излучения участками шаблонов, либо локализацией самого излучения с помощью, например, оптического проецирования изображения.

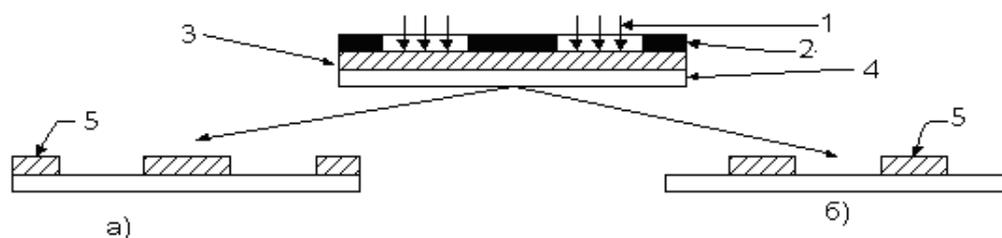
Под действием излучения происходящие в резистах процессы необратимо меняют их стойкость к специальным составам – проявителям.

Резисты, растворимость которых в проявителе увеличивается после облучения, называются позитивными.

Негативные резисты после облучения становятся практически нерастворимыми в проявителе.

После одинакового экспонирования слоев позитивных и негативных резистов при проявлении получают резистивные маски с противоположными рисунками.

Окнам маски из позитивного резиста соответствуют облученные участки; в маске из негативного резиста окна образуются на необлученных участках. (рисунок 3.10).



1 – актиничное излучение; 2 – шаблон; 3 – резист; 4 – подложка; 5 – резистивная маска

Рисунок 3.10 – Получение контактных резистивных масок с помощью позитивных (а) и негативных (б) резистов

3.5.1.2 Этапы и основные операции литографического процесса. Процесс литографии можно разделить на три этапа, каждый из которых включает ряд операций (рисунок 3.11).

I. Формирование слоя резиста: подготовка поверхности подложек, нанесение слоя резиста, 1-я термообработка (сушка) слоя.

II. Формирование резистивной контактной маски: передача топологического рисунка на слой резиста: совмещение и экспонирование, проявление, 2-я термообработка (задубливание).

III. Передача топологического рисунка с маски на материал формируемого слоя структуры ИМС (удаление материала (травление)), удаление резистивной маски.

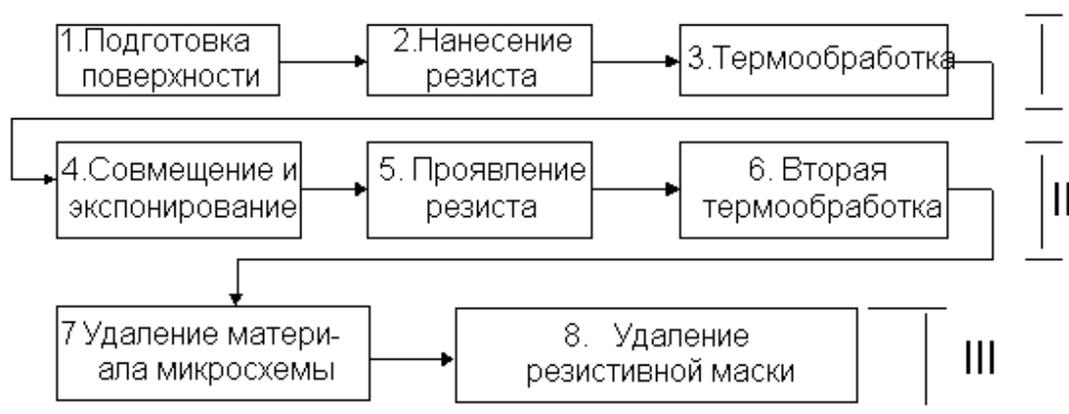


Рисунок 3.11 – Этапы ( I, II, III) и операции (1 – 8) литографического процесса

3.5.1.3 Классификация методов литографии. Методы литографии классифицируются в зависимости от типа применяемого актиничного излучения (рисунок 3.12).

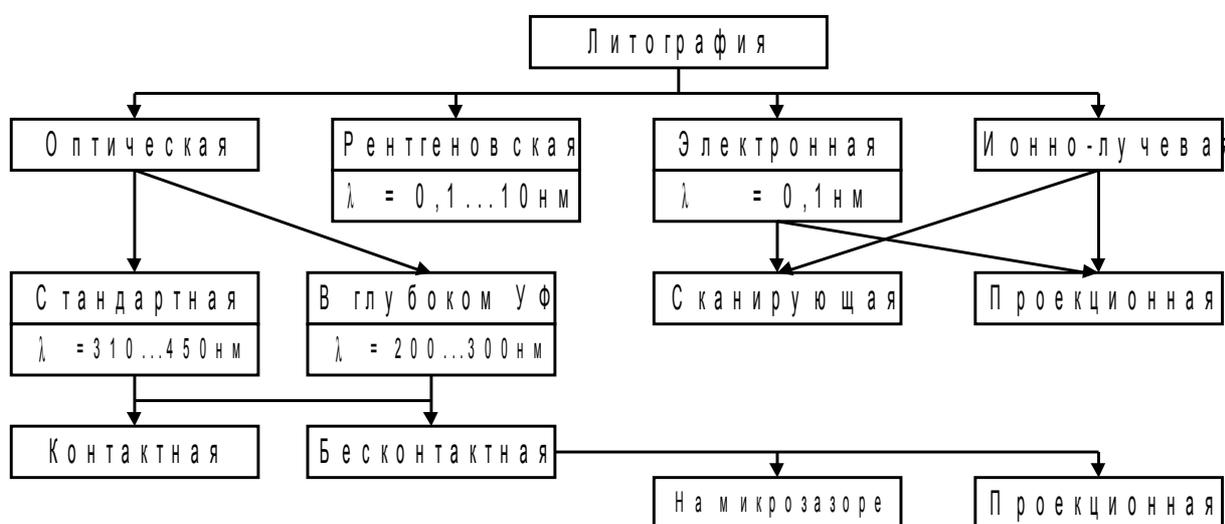


Рисунок 3.12 – Классификация литографических процессов

Оптическая литография (стандартная или в глубокой ультрафиолетовой области), в соответствии со способом экспонирования может быть контактной или бесконтактной (на микрозоре и проекционная).

При контактном способе фотошаблон и пластина с нанесенным фоторезистом соприкасаются. Контактный метод фотолитографии является основным в полупроводниковой промышленности, так как прост, дешев, высокопроизводителен.

При проекционном способе фотолитографии контакта фотошаблона с подложкой нет, что исключает возможные его повреждения. Проекционная печать по сравнению с контактной обеспечивает больший срок службы фотошаблонов и отсутствие искажений, связанных с износом фотошаблонов, но требует более дорогостоящего оборудования.

Электронная литография может выполняться путем последовательной передачи топологического рисунка на слой резиста сфокусированным единичным электронным лучом или путем одновременной проекции всего рисунка. То же можно сказать и об ионной литографии.

В таблице 3.2 проведено сравнение методов литографии по основным показателям.

Таблица 3.2 – Сравнительные характеристики методов литографии

Метод литографии	Станд. ширина линии, мкм	Плотн. дефектов, см <sup>-2</sup>	Производит., пласт/ч	Относит. стоимость
Контактная фотолитография	3	2.5	50	1
Проекционная фотолитография	2	1	65	6.2
Проекционная фотолитография с применением УФ света	1	1	50	6.7
Электронолитография	0.5	0.5	10	50
Рентгенолитография	0.3	1	20	10

### 3.5.2 Фотолитография

3.5.2.1 Основы метода. Для фотолитографии (оптическая, стандартная литография) применяют фоторезисты, чувствительные к ультрафиолетовому (УФ) излучению с длиной волны от 310 до 450 нм.

Фоторезисты представляют собой сложные полимерные композиции, в составе которых имеются фоточувствительные и пленкообразующие компоненты, растворители и специальные добавки. Последние вводят для улучшения условий

пленкообразования (разбавители), изменения фоточувствительности (сенсбилизаторы), повышения адгезии фоторезистивного слоя к подложкам, улучшения стойкости к воздействиям кислот, щелочей, высоких температур и др.

Фотошаблоны являются основными инструментами фотолитографии, с их помощью производится локальное облучение фотослоя в соответствии с топологией микросхемы. Фотошаблон для изготовления структур микросхем – плоскопараллельная пластина (или гибкая пленка) из прозрачного для УФ-излучения материала с нанесенным на ее рабочую поверхность непрозрачным пленочным рисунком, соответствующим топологии одного из слоев структуры микросхемы и многократно повторенным со строго определенным шагом в пределах рабочей области пластины (или пленки). Для основы фотошаблонов применяют оптическое боросиликатное стекло или полимерные пленки. Для выполнения рисунка применяют галоидно – серебряную фотографическую эмульсию (эмульсионные фотошаблоны), металлы (металлизированные фотошаблоны) и полупрозрачные для видимого света оксиды или другие материалы (транспарентные, цветные фотошаблоны).

#### 3.5.2.2 Основные этапы и операции фотолитографии. (см. рисунок 3.11)

I этап. Формирование фотослоя – этап, на котором на подложке формируется пленка из фоторезиста.

Этап включает операции 1 – 3.

1. Подготовка подложек к нанесению фоторезиста. Включает отмывку подложек в дистиллированной воде и обработку в специальных растворах.

Под подложкой в литографических процессах подразумевают тот материал, на котором формируют резистивный слой (монокристаллический и поликристаллический кремний, диоксид кремния, алюминий, медь, золото и т. п.).

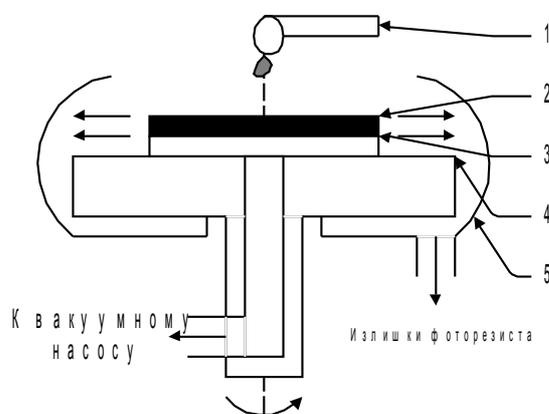
Назначение этой операции:

- очистить подложки от загрязнений;
- увеличить адгезию фоторезиста к подложке.

2. Нанесение слоя фоторезиста можно выполнять центрифугированием, распылением, окунанием, накаткой и т.д.

Метод центрифугирования (рисунок 3.13) применяется для круглых подложек, т.е. пластин кремния и других полупроводников. Подложки располагаются на диске центрифуги и удерживаются при вращении вакуумным прижимом. Несколько капель фоторезиста наносят на подложку и мгновенно включают центрифугу. При вращении центрифуги жидкий фоторезист растекается по поверхности подложки под действием центробежных сил.

Достоинства метода: высокая воспроизводимость толщины фотослоя в пределах каждой пластины и партии пластин, возможность получения тонких слоев (0,1 – 0,2 мкм).

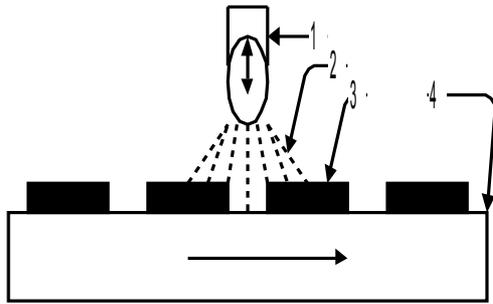


1 – дозатор фоторезиста (капельница); 2 – слой фоторезиста; 3 – подложка; 4 – диск центрифуги; 5 – сборник фоторезиста

Рисунок 3.13 – Схема процесса нанесения фоторезиста центрифугированием

Распыление применяют для нанесения фоторезиста на прямоугольные диэлектрические подложки. Нанесение фоторезиста производится форсункой, в которой для диспергирования струи раствора фоторезиста при выходе из сопла используется сжатый воздух (рисунок 3.14).

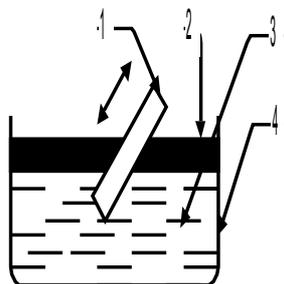
Достоинства метода: можно наносить слой на рельефные поверхности получать слои толщиной от 0,3 до 20 мкм с точностью 5%, краевое утолщение слоя отсутствует, расход фоторезиста существенно меньше. Недостаток метода: затягивание пыли и других загрязнений струей диспергированного фоторезиста.



1 – сопло форсунки; 2 – диспергированный фоторезист; 3 – подложки; 4 – стол установки

Рисунок 3.14 – Нанесение слоя фоторезиста распылением

Метод окунания – простое погружение подложки в фоторезист и извлечение из него с регулируемой скоростью 6 – 150 мм/мин (рисунок 3.15).

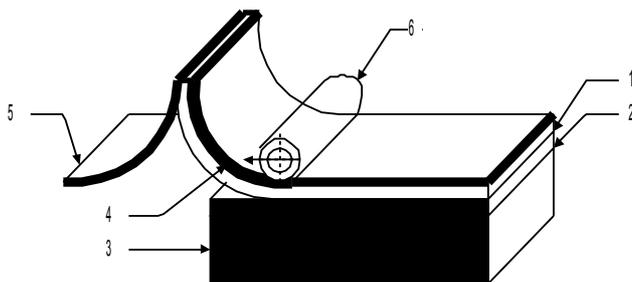


1 – подложка; 2 – слой фоторезиста; 3 – ванна; 4 – вода или растворитель

Рисунок 3.15 – Нанесение слоя фоторезиста окунанием

Накатка (рисунок 3.16) применяется для нанесения сухих пленочных фоторезистов, представляющих собой трехслойную ленту.

Слой фоторезиста заключен между несущей и более тонкой защитной полимерными пленками. Перед накаткой фоторезиста вращающимся валиком на подогретую подложку защитную пленку удаляют.



1 – пленочный фоторезист; 2 — пленка на подложке 3; 4 – несущая полимерная пленка; 5 – защитная пленка; 6 – валик для накатки

Рисунок 3.16 – Нанесение слоя фоторезиста накаткой

3. Первая термообработка (сушка) выполняется после нанесения слоя жидкого фоторезиста. В процессе сушки удаляется растворитель, увеличивается адгезия фотослоя к подложке.

Основными параметрами процесса сушки являются температура и время. Сушку проводят при  $90\text{ }^{\circ}\text{C} - 120\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течении 45 – 50 мин.

Сушка выполняется в термостатах, в термопечах под давлением азота, в ИК – печах. Сушка завершает процесс формирования фотослоя.

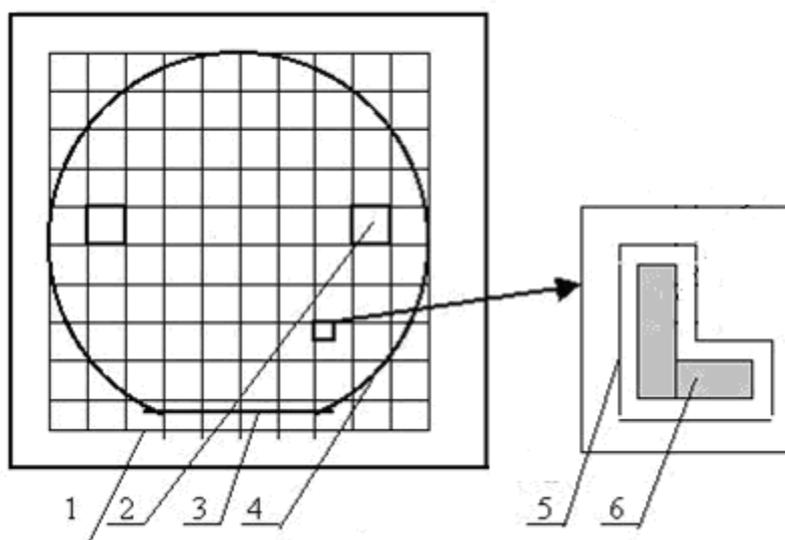
II этап. Формирование фотомаски – технологический этап, на котором в фотослое создается топологический рисунок.

Этап включает операции 4 – 6.

4. Совмещение и экспонирование. Совмещение выполняют визуально на той же установке, что и последующее экспонирование, путем наложения при наблюдении под микроскопом рисунков шаблона и подложки.

Совмещение необходимо для того, чтобы элементы очередного топологического слоя (на фотошаблоне) занимали определенное положение относительно элементов предыдущего слоя (на пластине).

Для совмещения шаблонов друг с другом в комплекте и каждого шаблона с рисунком на подложке применяются специальные топологические рисунки – фигуры совмещения в виде колец, крестов, штрихов и др. (рисунок 3.17).



1 – фотошаблон; 2 – модули для грубого совмещения; 3 – базовый срез на пластине для предварительной ориентации; 4 – пластина; 5 – знак совмещения на пластине; 6 – знак совмещения на шаблоне

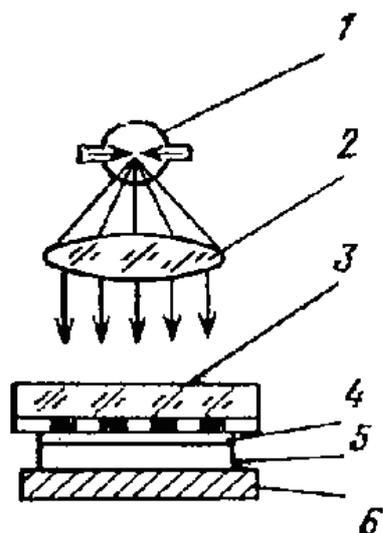
Рисунок 3.17 – Совмещение фотошаблона с пластиной

После каждой операции фотолитографии знаки совмещения переносятся на пластину. При каждой последующей операции знаки совмещения, имеющиеся на используемом в данный момент фотошаблоне, совмещаются со знаками совмещения на пластине.

Экспонирование – это создание скрытого изображения в пленке фоторезиста при помощи фотошаблона под действием УФ излучения. Операцию экспонирования проводят для того, чтобы в фоторезисте произошли фотохимические реакции, которые изменяют исходные свойства фоторезиста. В качестве источника ультрафиолетового излучения обычно используют ртутные лампы.

Экспонирование осуществляется контактным способом (соответственно и весь процесс литографии называют контактной фотолитографией) и выполняется после совмещения рисунков на шаблоне и подложке (рисунок 3.18).

Время экспонирования определяется интенсивностью излучения и толщиной фоторезистивного слоя и подбирается экспериментально.



1 – источник света; 2 – оптическая система; 3 – фотошаблон; 4 – фоторезист;  
5 – кремниевая пластина; 6 – столик

Рисунок 3.18 – Схема процесса экспонирования

5. Проявление – процесс удаления лишних в фотослое участков в соответствии с локальным облучением при экспонировании.

Проявление негативных фоторезистов проводят в органических растворителях: толуоле, трихлорэтилене, диоксане и др.

Проявление позитивных фоторезистов проводят в слабых водных растворах КОН, NaOH.

6. Вторая термообработка (задубливание) проводится для удаления проявителя, воды, повышения химической стойкости и адгезии фотомаски к подложке.

Для большинства фоторезистов максимальная температура задубливания составляет 150 °С, общее время 1 – 1,5 ч.

III этап. Передача изображения с фотомаски на материал слоя ИМС. На этом этапе рисунок, который был сформирован во временной маске, переносится на слой микросхемы.

Этап включает операции 7 – 8.

7. Удаление слоя микросхемы. Основной способ травление. Травитель должен взаимодействовать только с удаляемым материалом, так как возможно нежелательное удаление ранее сформированных областей структур ИМС, и фоторезиста.

Качество травления определяется величиной адгезии фотомаски к подложке, наличием в маске дефектов и зависит от свойств травителя, способа и режимов травления.

8. Удаление слоя фоторезиста имеет целью удалить использованную маску, и провести тщательную очистку пластин от всех загрязнений.

Удаление выполняют плазмохимическим способом, и в концентрированных растворах проявителей (органических, щелочных).

Операции удаления фотомаски разрабатываются для каждого конкретного случая в зависимости от марки фоторезиста, материала подложки и др.

### **3.6 Методы получения полупроводниковых слоев и переходов**

#### **3.6.1 Диффузионное легирование**

3.6.1.1 Основы метода. Диффузионное легирование основано на использовании известного явления диффузии, т. е. направленного перемещения частиц вещества в сторону убывания их концентрации. Движущей силой диффузии является градиент концентрации атомов или молекул вещества. Чем больше градиент концентрации, тем интенсивнее диффузия.

При изготовлении диффузионных структур на поверхности полупроводниковых пластин создают повышенные концентрации легирующей примеси, которая начинает диффундировать вглубь.

Диффузия применяется для внедрения легирующих примесей в полупроводниковые пластины с целью получения:

1) областей противоположного по сравнению с исходным полупроводником типа проводимости (эмиттерные, базовые области биполярных ИМС, области истоков и стоков МОП – ИМС, изолирующие области);

2) областей с более низким электросопротивлением (резисторы, скрытые  $n^+$ ,  $p^+$  – области, приконтактные области);

3) глубоких уровней в запрещенной зоне полупроводника уменьшающих время жизни неосновных носителей тока (золото и никель).

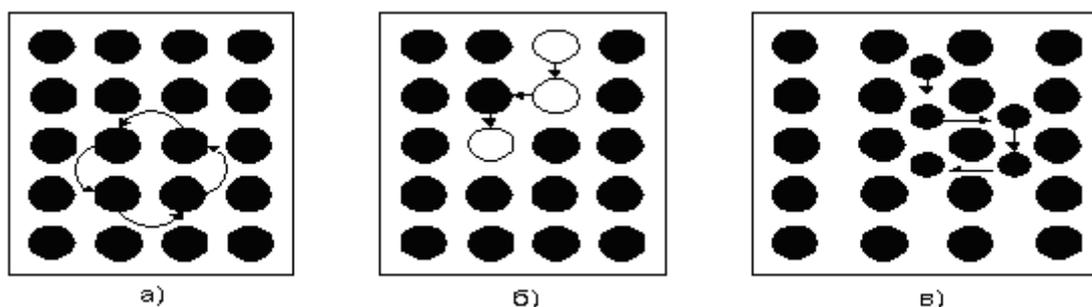
Диффузионные слои имеют толщины от сотых долей микрометров до нескольких микрометров.

Отличительной особенностью диффузионно-легированных слоев является неравномерное распределение концентрации примеси по глубине. Концентрация максимальна на поверхности и убывает в глубь слоя.

3.6.1.2 Механизмы диффузии. В полупроводниках диффузия может осуществляться тремя способами (рисунок 3.19).

При обменном механизме происходит простой обмен местами двух атомов или кольцевой обмен с участием нескольких атомов. При вакансионном механизме диффузия осуществляется путем последовательных перескоков примесных атомов замещения из собственных узлов в вакантные (свободные) узлы. Диффузия при междуузельном механизме осуществляется в результате последовательных переходов примеси внедрения из одного междуузлия в другое. Атомы примеси как бы "продавливаются" между атомами, находящимися в узлах кристаллической решетки.

Для основных легирующих примесей в германии и кремнии наиболее вероятен вакансионный механизм.



а – кольцевой; б – вакансионный; в – междуузельный

Рисунок 3.19 – Механизм диффузии в полупроводниках

3.6.1.3 Законы Фика. Законы диффузии Фика описывают процессы диффузионного переноса вещества.

Первый закон Фика (первое уравнение диффузии) определяет поток атомов примеси ( $F$ ) из области с повышенной концентрацией в область с пониженной концентрацией

$$F = -D \frac{dN}{dx}, \quad (3.2)$$

где  $N$  – концентрация примеси;

$x$  – глубина диффузии;

$D$  - коэффициент диффузии.

Коэффициент диффузии численно равен количеству атомов примеси, проходящих за единицу времени через единичную площадку, нормальную к направлению диффузии, при градиенте концентрации примеси ( $dN/dx$ ), равном единице.

Знак минус в правой части уравнения указывает, что диффузионное перемещение атомов происходит в сторону убывания концентрации.

Второй закон Фика (основное уравнение диффузии) характеризует скорость накопления частиц:

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{d^2 N}{dx^2}, \quad (3.3)$$

где  $N$  – концентрация примеси;

$x$  – глубина диффузии;

$t$  – время;

$D$  - коэффициент диффузии.

Второй закон Фика определяет концентрацию вводимой в полупроводник примеси в любой момент времени на любом расстоянии от поверхности при заданной температуре диффузии.

Температура входит во второе уравнение не явно, а через коэффициент диффузии:

Коэффициент диффузии, входящий в уравнение, является константой, характеризующей скорость диффузии.

$$D = D_0 \exp(-\Delta E / (kT)), \quad (3.4)$$

где  $D_0$  – постоянная величина, имеющая размерность коэффициента диффузии и зависящая от рода примеси и материала полупроводниковой пластины;

$\Delta E$  – энергия активации процесса диффузии данной примеси, т.е. энергия, необходимая для перескока атома примеси в вакантный узел решетки;

$T$  – абсолютная температура диффузии.

Величины  $D_0$  и  $\Delta E$  для наиболее распространенных примесей в кремнии представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Характеристики основных атомов примесей

Тип электропроводности	Примесь	$D_0$ , см <sup>2</sup> /с	$\Delta E$ , эВ
Дырочный (р-тип)	Бор (В)	10,6	3,6
Электронный (n-тип)	Фосфор (Р)	10,5	3,7
	Мышьяк (As)	0,44	3,6
	Сурьма (Sb)	4,0	3,9

Процессы диффузии в полупроводниках ведут при высоких температурах (800 – 900 °С для германия и 1000 – 1200 °С для кремния).

Распределение легирующей примеси по глубине диффузионного слоя  $N = f(x)$  (профиль легирования) для конкретных условий диффузии находится путем решения основного уравнения диффузии. Решение дифференциального уравнения (3.3) зависит от граничных условий.

Наибольшее практическое значение получили два вида условий, которые соответствуют двум случаям осуществления диффузии: из бесконечного источника и ограниченного источника. Рассмотрим оба эти случая.

3.6.1.4 Диффузия из бесконечного источника примеси. Этот случай соответствует ситуации, когда на поверхности пластины поддерживается постоянная концентрация диффундирующей примеси  $N_0$ . Т.е. в процессе диффузии примесь в зону диффузии поставляется постоянно.

Начальное ( $t=0$ ) и граничное ( $x=0$ ) условия запишутся так:

$$N(x > 0, 0) = 0; N(0, t \geq 0) = N_0, \quad (3.5)$$

В этом случае решение уравнения диффузии (3.3) имеет вид:

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}, \quad (3.6)$$

где  $N(x, t)$  – распределение концентрации диффундирующей примеси по глубине полупроводника с течением времени;

$N_0$  – концентрация примеси на поверхности пластины;

$x$  – глубина диффузии;

$t$  – время процесса;

$\operatorname{erfc}$  – условное обозначение функции дополнения интеграла ошибок Гаусса до единицы.

Для определения этой функции существуют специальные таблицы или графики. Величину  $\sqrt{Dt}$ , имеющую размерность длины, называют диффузионной длиной.

Распределение примеси при диффузии из бесконечного источника показано на рисунке 3.20.

Особенность распределения:

– монотонное убывание концентрации примеси от поверхности вглубь полупроводника;

- поверхностная концентрация постоянна независимо от времени диффузии;
- с течением времени градиент концентрации уменьшается (распределение более равномерное).

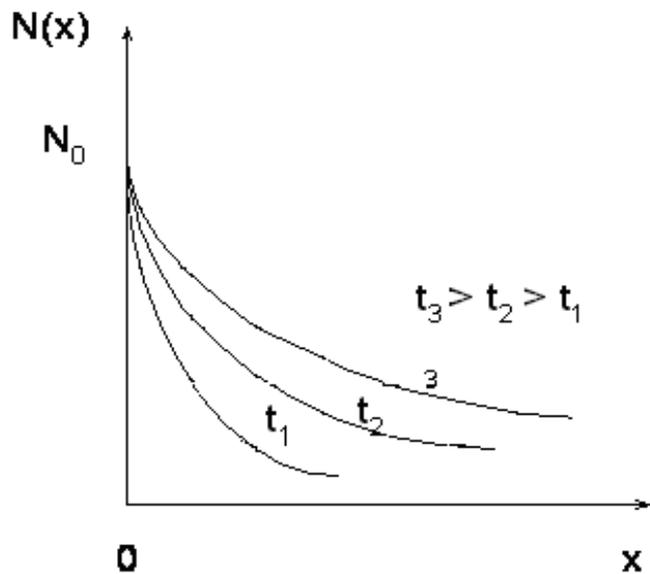


Рисунок 3.20 – Распределение примеси при диффузии из бесконечного источника.

3.6.1.5 Диффузия из ограниченного источника. В тонком поверхностном слое создается определенное количество примеси (доза примеси  $Q$ ). Диффузия ведется из этого слоя, приток примеси извне отсутствует.

В этом случае начальные и граничные условия запишутся в виде:

$$\left. \frac{\partial N(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \text{ при } t \geq 0, x=0; \quad (3.7)$$

$$N(x, 0) = N_0 \text{ для } t=0, 0 \leq x \leq \Delta h; \quad N(x, 0)=0 \text{ для } t=0, x > \Delta h \quad (3.8)$$

В этом случае решение уравнения диффузии (3.3) имеет вид:

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-x^2/4(Dt)\right), \quad (3.9)$$

где  $N(x, t)$  – распределение концентрации диффундирующей примеси по глубине полупроводника с течением времени;

$Q$  – доза примеси;

$x$  – глубина диффузии;

$t$  – время процесса;

$D$  – коэффициент диффузии.

Полученное выражение (3.9) является функцией распределения Гаусса и отражает распределение примеси при диффузии из бесконечно тонкого слоя. На рисунке 3.21 приведены кривые этого распределения.

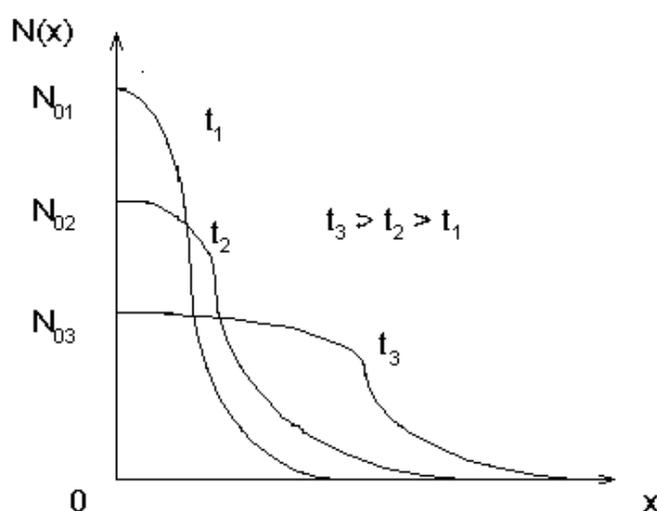


Рисунок 3.21 – Распределение примеси при диффузии из ограниченного источника.

Особенность распределения:

- монотонное убывание концентрации примеси от поверхности вглубь полупроводника;
- поверхностная концентрация уменьшается по мере увеличения времени;
- течением времени градиент концентрации уменьшается (распределение более равномерное).

Диффузия может быть двухстадийной и одностадийной. Двухстадийная диффузия состоит из следующих стадий:

1) Первая стадия ("загонка"). В тонкий приповерхностный слой полупроводниковой пластины вводится определенное количество легирующей примеси из неограниченного источника. Поверхностная концентрация примеси после этапа загонки велика. Первая стадия обычно проводится быстро (1 – 2 часа) и при сравнительно низких температурах (900 – 1000 °С).

2) Вторая стадия ("разгонка").

Проводится при отсутствии источника примеси (из ограниченного источника). При этом происходит перераспределение введенной на первой стадии примеси на определенную глубину - поверхностная концентрация примеси снижается за счет ухода вглубь полупроводника. Вторая стадия, как правило, совмещается со следующей операцией термического оксидирования, т. е. процесс ведут в окисляющей среде. Температура этой стадии диффузии выше ( $> 1100$  °С) по сравнению с первой и время больше (10 – 20 часов).

Одностадийная диффузия проводится в одну стадию – "загонку". В тонкий приповерхностный слой полупроводниковой пластины вводится определенное количество легирующей примеси из неограниченного источника.

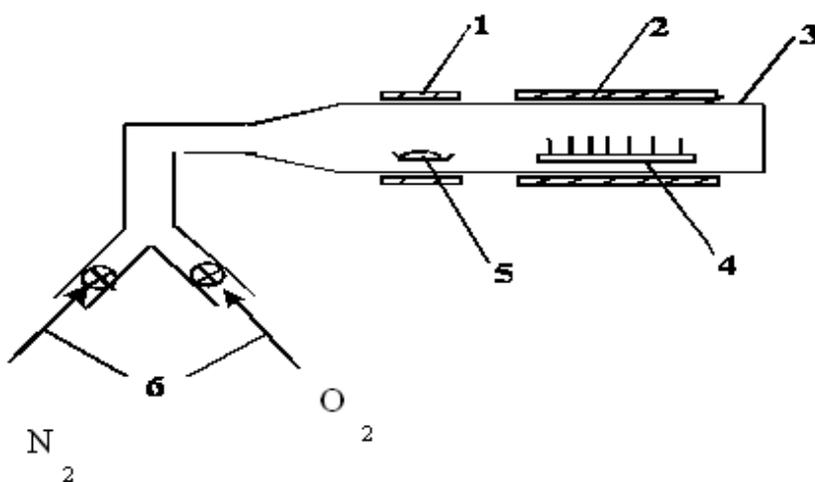
3.6.1.6 Техника выполнения диффузионного легирования. Основным для проведения диффузии примесей в пластины кремния является способ проточной трубы. Диффузию проводят в сравнительно ограниченном диапазоне температур. Для кремния, например, это 1000 – 1250 °С.

По способу проточной трубы пластины кремния подвергаются высокотемпературной обработке в потоке инертного газа, несущего пар примеси. При этом в качестве источников примеси (диффузантов) могут использоваться твердые, жидкие и газообразные вещества.

Установка состоит из открытой кварцевой трубы, проходящей через две трубчатые печи с независимой регулировкой температуры, обеспечивающие две зоны постоянной температуры (рисунок 3.22).

В одну зону помещаются пластины кремния, в другую – источник примеси. Диапазон рабочих температур составляет в зоне источника примеси 400 – 1000 °С, в зоне диффузии 1000 – 1250 °С.

Через трубу пропускается поток газа, переносящий молекулы примеси в зону диффузии. Обычно используют азот, аргон, иногда газы с примесями кислорода или водорода. В зоне диффузии происходят химические реакции, приводящие к образованию стеклообразных слоев на поверхности кремния, которые становятся источником примеси.



1,2 – трубчатые печи; 3 – кварцевая труба; 4 – кварцевая лодочка с пластинами кремния; 5 – источник примеси; 6 – газовые потоки

Рисунок 3.22 – Схема установки для диффузии в потоке газа – носителя для твердых источников примеси

Основные диффузаны. Твердые диффузаны: безводная пятиокись фосфора или фосфорный ангидрид –  $P_2O_5$ ; нитрид фосфора –  $P_3N_5$ ; борный ангидрид –  $B_2O_3$ . Жидкие диффузаны: оксихлорид фосфора –  $POCl_3$ ; трихлорид фосфора –  $PCl_3$ ; пентафторид фосфора –  $PF_5$ ; трехбромистый бор –  $BBr_3$ . Газообразные диффузаны: фосфин –  $PH_3$ ; треххлористый бор –  $BCl_3$ ; диборан –  $B_2H_6$ .

### 3.6.2 Ионное легирование

3.6.2.1 Основы метода. Ионное легирование осуществляется ионизированными атомами примеси, имеющими энергию, достаточную для внедрения в полупроводник. Ионы бора, фосфора или мышьяка с энергиями в диапазоне 3...500 кэВ внедряются в приповерхностную область кремния на глубину 0,02...1 мкм. Движущей силой ионного легирования является начальная кинетическая энергия ионов.

Основной особенностью ионного легирования является возможность воспроизводимого получения заданной концентрации примеси на данной глубине практически на любой площади пластины (практически любого профиля легирования). Распределениями примесей можно легко управлять в широких пределах, изменяя дозу облучения, энергию и угол падения ионов. Ионное легирование осуществляется в два этапа: внедрение ионов, отжиг.

3.6.2.2 Внедрение ионов. Движение ионов в полупроводнике определяется их начальной кинетической энергией, а не градиентом концентрации, как при диффузии. В зависимости от направления ионов внедрение может проходить по двум механизмам, приводящим к различным глубине проникновения и распределению примеси.

Ориентированное внедрение – происходит, если направление падения ионов совпадает (или почти совпадает) с кристаллографическим направлением монокристаллической подложки. Движение ионов происходит по каналам на большую глубину.

Разориентированное внедрение ионов происходит при угле падения больше критического и сопровождается неупорядоченным движением ионов от одного столкновения с узлом кристаллической решетки до другого столкновения. Это основной механизм внедрения. Длина пути иона от поверхности подложки (точка А на рисунок 3.23) до точки останова (точка В) называется длиной пробега  $R$ , а ее проекция на направление первоначального движения – нормальным пробегом  $R_n$ . Именно эта величина и определяет глубину проникновения иона в подложку.



Рисунок 3.23 – К определению параметров пробега ионов.

Распределение ионов при разориентированном внедрении определяется законом Гаусса, так как столкновения ионов с атомами решетки носят вероятностный характер (3.10)

$$N(x) = \left[ \frac{Q}{\Delta R_n \sqrt{2\pi}} \right] \cdot \exp \left[ - (x - R_n)^2 / 2\Delta R_n^2 \right], \quad (3.10)$$

где  $Q$  – доза облучения;

$R_n$  – средний нормальный пробег;

$\Delta R_n$  – среднеквадратическое отклонение нормальных пробегов;

$x$  – глубина внедрения ионов.

На рисунке 3.24 приведены кривые распределения.

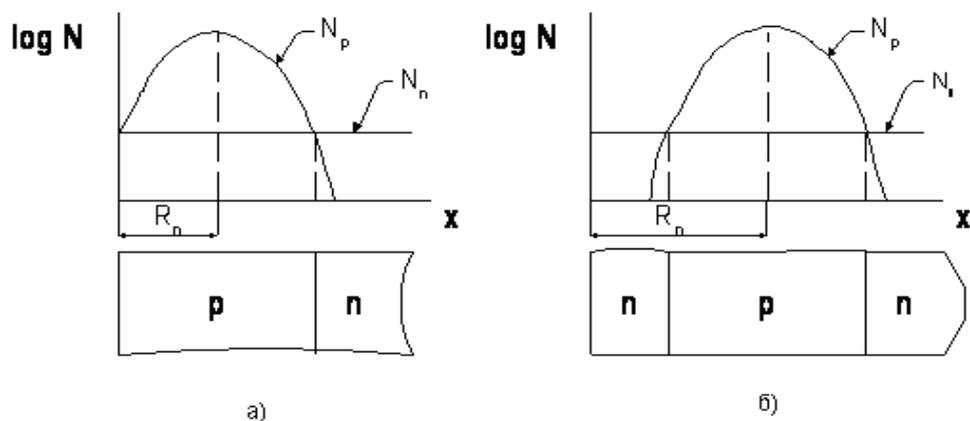
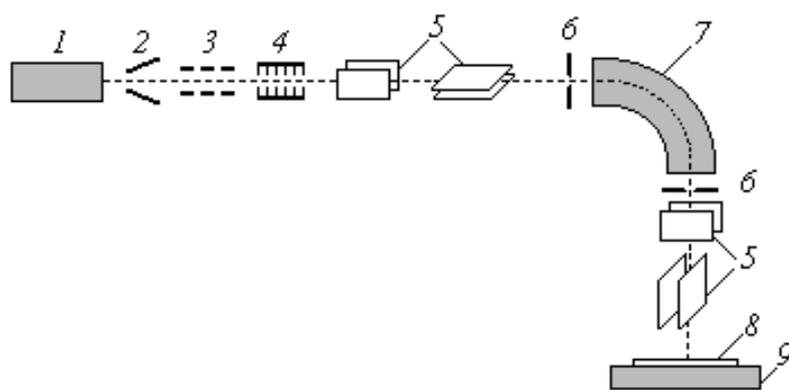


Рисунок 3.24 – Распределение ионов с низкими (а) и высокими (б) значениями энергии при разориентированном внедрении.

Максимум распределений (рисунок 3.24) соответствует не поверхности пластин, как в случае термической диффузии, а расстоянию от поверхности, равном среднему нормальному пробегу ионов.

С увеличением энергии максимум распределения сдвигается вглубь подложки, это позволяет получать скрытые заглубленные слои с проводимостью противоположного типа.

3.6.2.3 Техника выполнения ионного легирования. Ионное легирование выполняют в установках напоминающих укорители (рисунок 3.25).



1 – источник ионов; 2 – вытягивающий электрод; 3 – электромагнитная фокусирующая линза; 4 – ускоряющий электрод; 5 – отклоняющие ионный пучок пластины; 6 – входная и выходная диафрагмы; 7 – масс-спектрометр; 8 – подложка; 9 – держатель подложки

Рисунок 3.25 – Схема установки для ионной имплантации

Управление дозой при ИИ затруднено рядом факторов. Это наличие потока нейтральных частиц, обмен энергии ионов с молекулами газов, вторичная электронная эмиссия из мишени, эффект обратного ионного распыления.

Для ликвидации последствий действия этих факторов используют следующие технические приемы. Нейтральные молекулы отсеивают с помощью масс-спектрометра (его магнитным полем не отклоняет нейтральные частицы и они не попадают в диафрагму). Кроме того, в камере поддерживается достаточно высокий

вакуум, предотвращающий процесс нейтрализации ионов. Вторичную электронную эмиссию подавляют, располагая около подложки ловушку Фарадея. От загрязнений поверхности кремния вследствие полимеризации углеводородов ионную имплантацию проводят через окисную пленку, которую затем удаляют.

Достоинства ионного легирования: универсальность, так как с его помощью можно вводить любые примеси в любое твердое тело; высокая чистота легирования, практически исключая попадание неконтролируемых примесей в легированный слой; ионное легирование проводится при низких температурах (вплоть до комнатных), что позволяет использовать в качестве масок слои из фоторезиста; данный метод легирования гораздо более управляем, чем метод диффузии, изменяя плотность пучка ионов и их энергию, можно в достаточно широких пределах варьировать количество имплантированных примесных атомов и глубину их залегания; возможность формирования практически любого профиля легирования; возможность получения скрытых легированных областей; точное воспроизведение рисунка маски.

Недостатки: необходимость отжига; сложность воспроизводимого легирования слоев толщиной более 1 мкм; сложность однородного легирования пластин большого диаметра из-за расфокусировки луча при полных отклонениях, сложность оборудования.

### **3.7 Процессы травления**

Травление – процесс с использованием специальных веществ (травителей) для общего или локального удаления поверхностного слоя твердого тела на заданную глубину.

При всем многообразии методов травления их можно разделить на две большие группы:

- жидкостное (химическое) травление;
- сухое (плазмо–химическое) травление.

Жидкостное травление – это химическая реакция жидкого травителя с твердым телом с образованием растворимого соединения; последнее смешивается с травителем и в дальнейшем удаляется вместе с ним.

Плазмохимическое травление (ПХТ) проводят в высокочастотной (ВЧ) газоразрядной плазме пониженного давления. В ходе процесса ПХТ вещество обрабатывается химически активными частицами плазмы и преобразуется в летучее соединение.

Подбирая травитель и режимы травления (концентрация, температура, время, давление, частота), можно весьма точно регулировать толщину удаляемого слоя.

Травление применяют для создания:

- диффузионных масок в слое термически окисленного кремния;
- омических контактов в слое окисла;
- металлической разводки.

Травление может быть локальным (размерным), т.е. с использованием защитной маски (чаще всего фоторезистивной) или полирующим т.е. полное стравливание.

Травление может быть изотропным и анизотропным.

При анизотропном травлении глубина травления ( $D$ ) много больше величины бокового подтравливания ( $L$ ) (рисунок 3.26).

Отношение  $D/L$  называют степенью анизотропии, и ее величина зависит от многих физических параметров. Сухое (плазмохимическое) травление - анизотропно, для него  $D/L \gg 1$ .

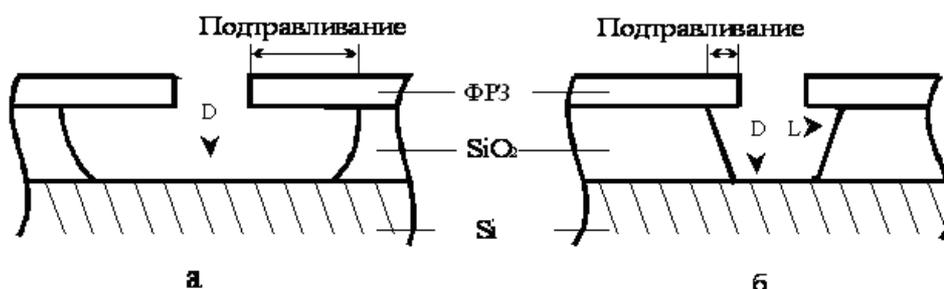


Рисунок 3.26 – Анизотропное (а) и изотропное (б) травление.

Изотропное травление происходит неупорядоченно, с одинаковой скоростью по всем пространственным направлениям - L и D. При изотропном травлении величина  $D/L \approx 1$ . Жидкостное травление в основном изотропное, для него характерно большое боковое подтравливание (L),

Степень анизотропии жидкостного травления определяется в основном статическими характеристиками типа адгезии и степени задубленности резиста, состава и температура травителя и т.п.

При сухом травлении степень анизотропии во многом зависит от таких динамических параметров, как мощность разряда, давление реакционных газов и скорость эрозии резиста.

За последние годы разработаны и широко используются методы, основанные на том, что скорость химической реакции, лежащей в основе классического травления, зависит от кристаллографического направления. Наименьшая скорость свойственна направлению (111), в котором плотность атомов на единицу площади максимальна, а наибольшая — направлению (100), в котором плотность атомов минимальна. Поэтому при использовании специальных анизотропных травителей скорость травления оказывается разной в разных направлениях и боковые стенки лунок приобретают определенный рельеф (рисунок 3.27).

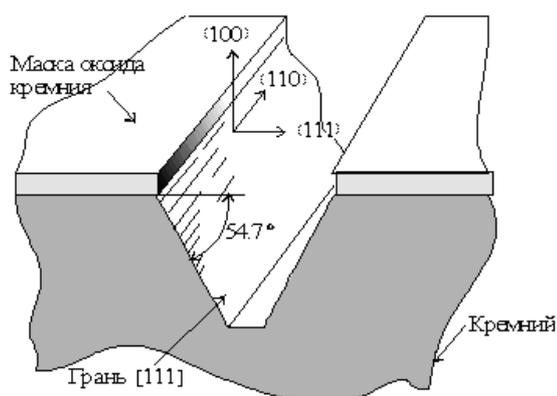


Рисунок 3.27 – Преимущественное травление кремния вдоль кристаллографического направления (100).

Селективность травления. Отношение скоростей травления различных материалов называют коэффициентом селективности  $K$ . Эта характеристика имеет важное значение для обеспечения заданного геометрического рельефа и свойств поверхности, как при планарном удалении материала пленки, так и размерном травлении. В том случае когда нужно удалить только поверхностный слой, например на структуре кремний (подложка) - диоксид кремния (слой), необходимо, чтобы скорость травления кремния была меньше скорости травления диоксида кремния. Это обеспечивает меньшее подтравливание материала подложки при окончании процесса травления слоя. В случае размерного травления скорость травления материала следующего слоя должна быть выше предыдущего. Это обеспечивает меньшее боковое подтравливание слоя. Различие в скоростях травления определяется как сочетанием применяемых материалов, так и режимом процесса.

В заключение проведем сравнительный анализ основных характеристик жидкостного и плазмохимического методов травления (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Характеристики различных методов травления

Метод травления	$V_{тр}$ , нм/с	Анизотропия	Селективность
Жидкостное	8 – 150	~ 1	10...100
Плазмохимическое	2...10	2...5	10...50

### 3.8 Контрольные вопросы

1. В чем состоит сущность метода термовакuumного напыления?
2. Назовите достоинства и недостатки метода термовакuumного напыления.
3. Каков механизм напыления пленок путем физического катодного распыления?
4. В чем состоит отличие методов физического катодного и реактивного катодного распыления?
5. В результате чего происходит образование пара вещества в методе ионно–плазменного напыления?
6. Для чего применяются методы напыления тонких пленок?

7. В чем сущность термического окисления кремния?
8. Какие функции выполняет пленка диоксида кремния на кремнии?
9. Чем определяется качество окисной пленки и от чего оно зависит?
10. Дайте определение процесса эпитаксиального наращивания. Какие виды эпитаксии вы знаете?
11. В чем заключается уникальная особенность эпитаксии?
12. В чем отличие процессов гомо– и гетероэпитаксии и для чего они применяются?
13. Какие методы легирования полупроводников вы знаете?
14. Что такое процесс диффузионного легирования полупроводников?
15. Какие законы, отражающие процесс высокотемпературной диффузии, вы знаете?
16. Что такое процесс ионной имплантации?
17. В чем особенность профиля легирования полупроводника при ионной имплантации?
18. Что такое литография? Для чего применяются литографические процессы?
19. Что лежит в основе классификации процессов литографии. Назовите основные виды литографии?
20. Назовите основные этапы и операции процесса фотолитографии.
21. В чем состоит процесс травления, и для чего он применяется?
22. Что такое степень анизотропии травления?
23. Какие процессы травления вы знаете? Охарактеризуйте их.

## 4 Типовые маршруты изготовления структур микросхем

### 4.1 Изготовление биполярных структур

Для многих ИМС исходными заготовками являются пластины кремния с эпитаксиальными слоями. Толщина исходной кремниевой пластины, составляет обычно величину порядка 400 мкм. Толщина эпитаксиального слоя, как правило, находится в диапазоне от 4 до 15 мкм.

Элементы биполярных ИМС формируют в отдельных электрически изолированных друг от друга и от общей пластины областях – карманах. Изоляция осуществляется по периметру с помощью  $p^+$  – разделительных областей, а снизу – такой же границей  $p$ - $n$  – перехода эпитаксиальный слой – подложка..

В соответствии с принципом совместимости элементов одновременно с транзисторами в таких же изолированных карманах формируют диоды, резисторы, конденсаторы. На заключительных стадиях маршрута выполняют металлизацию: контакты к активным областям, проводящие дорожки между элементами, контактные площадки для внешних электрических соединений. Металлизация осуществляется обычно с помощью напыления пленки из алюминия с последующим локальным травлением.

Рассмотрим более подробно эти операции на примере планарного – эпитаксиального транзистора. Основные операции технологического процесса формирования структуры транзистора представлены на рисунке 4.1.

На подложке кремния  $p$  – типа формируют эпитаксиальный слой монокристаллического кремния  $n$  – типа (рисунок 4.1 а).

Затем проводят термическое окисление (рисунок 4.1 б), и методом фотолитографии формируют окна под разделительную диффузию, т.е. маска из слоя  $SiO_2$  закрывает области, где будут изготавливаться биполярные транзисторы и другие элементы схемы (рисунок 4.1 в).

Следующим этапом проводят разделительную диффузию акцепторной примесью (рисунок 4.1 в) так, чтобы атомы примеси достигли подложки. В

результате получается, что элементы схемы будут отделены друг от друга слоем р – типа.

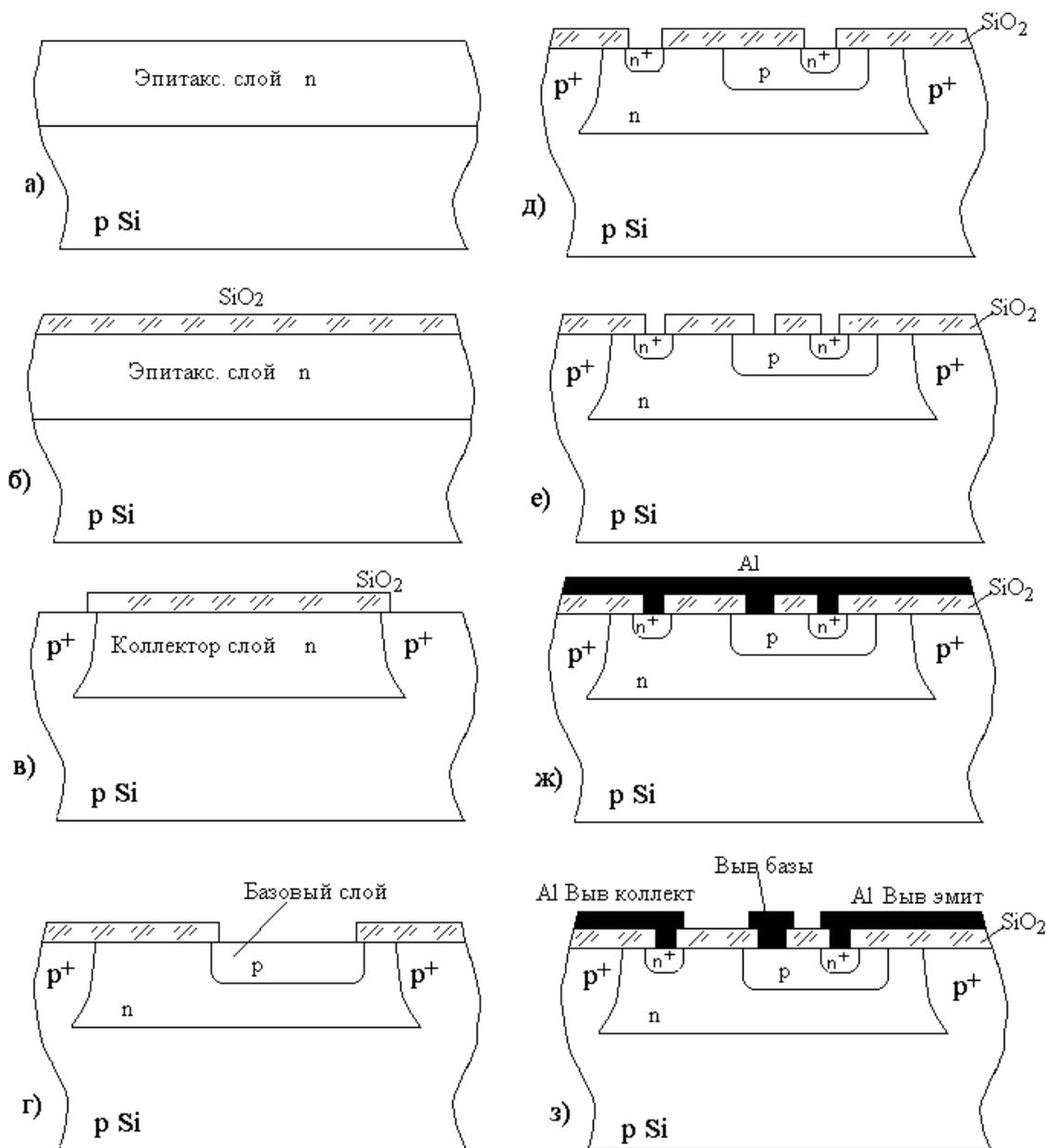


Рисунок 4.1 – Структура планарно – эпитаксиального транзистора.

Проводят второе термическое окисление, вторую фотолитографию и вторую диффузию акцепторной примесью с тем, чтобы сформировать базовый слой транзистора (рисунок 4.1 г). Эта диффузия требует меньшее время, так как глубина базового слоя 2,5 – 2,7 мкм меньше, чем при разделительной диффузии.

Затем проводят ещё одно термическое окисление и третью фотолитографию, при которой вскрываются окна под эмиттерную область и окно подлегирования коллектора, и проводят диффузию донорной примесью (рисунок 4.1 д). В этих областях создается максимальная концентрация примеси. Глубина  $n^+$  – слоев составляет примерно 2 мкм. Высокая концентрация примеси в месте вывода коллектора исключает появление выпрямляющего контакта металл – полупроводник (контакт Шоттки).

После четвертого заключительного термического окисления и четвертой фотолитографии вскрывают окна в окисле для контактов, которые обеспечивают доступ к областям эмиттера, базы и коллектора (рисунок 4.1 е).

В результате термовакуумного напыления получают сплошную пленку алюминия (рисунок 4.1 ж).

На заключительном этапе проводят последнюю пятую фотолитографию, при которой в пленке Al формируют рисунок разводки – проводящие дорожки, соединяющие элементы микросхемы друг с другом, и контактные площадки, обеспечивающие электрическое соединение внешних выводов микросхемы с кристаллом (рисунок 4.1 з).

Топология транзистора (вид на транзистор в плане) показан на рисунке 4.2.

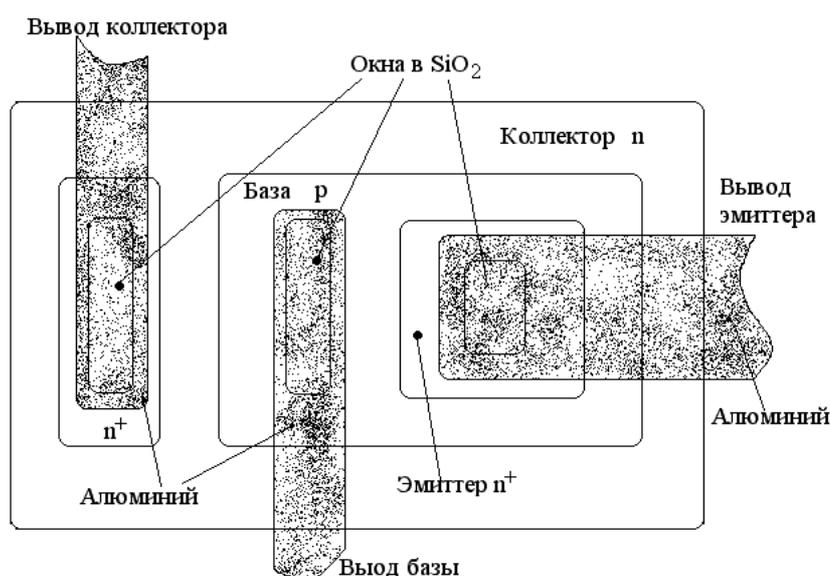


Рисунок 4.2 – Топология планарно – эпитаксиального транзистора

Таким образом, в процессе формирования транзистора использовались: пять фотолитографий, четыре термических окисления, три процесса диффузии, по одному процессу эпитаксии и термическому напылению алюминия не считая ряда вспомогательных операций: очистка, промывка, удаление фоторезиста и т.д.

## 4.2 Изготовление МОП-структур

Транзисторы со структурой МОП представляют собой одну из разновидностей полевых транзисторов. МОП–транзисторы имеют существенные преимущества перед биполярными по конструкции и электрофизическим параметрам.

Достоинства:

- большое входное сопротивление схем, транзисторы управляются не током, а напряжением и, как следствие – большая нагрузочная способность;
- малая мощность рассеивания, т.к. токи очень малы (10-100 мкА);
- лучшая, чем у биполярных схем, технологичность (меньше требуется технологических операций);
- отсутствие резисторов и областей изоляции, как результат – маленькая площадь;
- высокая помехоустойчивость.

Недостатки:

- недостаточная технологической воспроизводимости параметров;
- худшая, чем у биполярных схем, радиационная стойкость (из-за тонких окислов).

Технология изготовления МОП-транзистора значительно проще, чем биполярного. В таблице 4.1 дан сравнительный анализ технологии изготовления биполярных и МОП – интегральных схем

Таблица 4.1 – Сравнение ключевых процессов и условий технологии производства биполярных и МОП – интегральных схем

Биполярная технология	МОП – технология
4-7 процессов легирования (имплантация и/или диффузия)	1-3 процесса легирования (имплантация, диффузия)
Необходимость полной изоляции элементов (изолированных островков)	К изоляции предъявляются менее жёсткие требования
Эпитаксиальный процесс является одной из основных операций	Эпитаксиальный процесс не обязателен
Используется от 6 до 8 фотолитографий	Используется 4 - 6 фотолитографий
Более 100 технологических операций	Около 30 технологических операций
10 процессов с температурой около (или выше) 1000 С	2 процесса с температурой около (или выше) 1000 С
Коэффициент передачи транзистора зависит от режимов легирования и термообработки	Коэффициент передачи транзистора существенно не зависит от режимов легирования

Наиболее ответственные моменты в технологии МОП ИМС: создание подзатворного оксида, точное совмещение затвора с каналом и получение структур с малой длиной канала.

Подзатворный оксид является составной частью транзистора, к нему предъявляются жесткие требования: высокая электрическая прочность, минимальный заряд в объеме и на границе Si – SiO<sub>2</sub>, максимальная стабильность свойств и др.

Затвор не должен перекрывать области истока стока, так как возникающие паразитные емкости уменьшают быстродействие ИМС.

Длина канала определяет время пролета носителей тока от истока к стоку и, следовательно, быстродействие МОП ИМС.

Рассмотрим наиболее простой типовой процесс изготовления МОП ИМС с металлическим затвором. и толстой пленкой оксида между металлизацией и пластиной кремния. Основные операции технологического процесса формирования структуры транзистора представлены на рисунке 4.3.

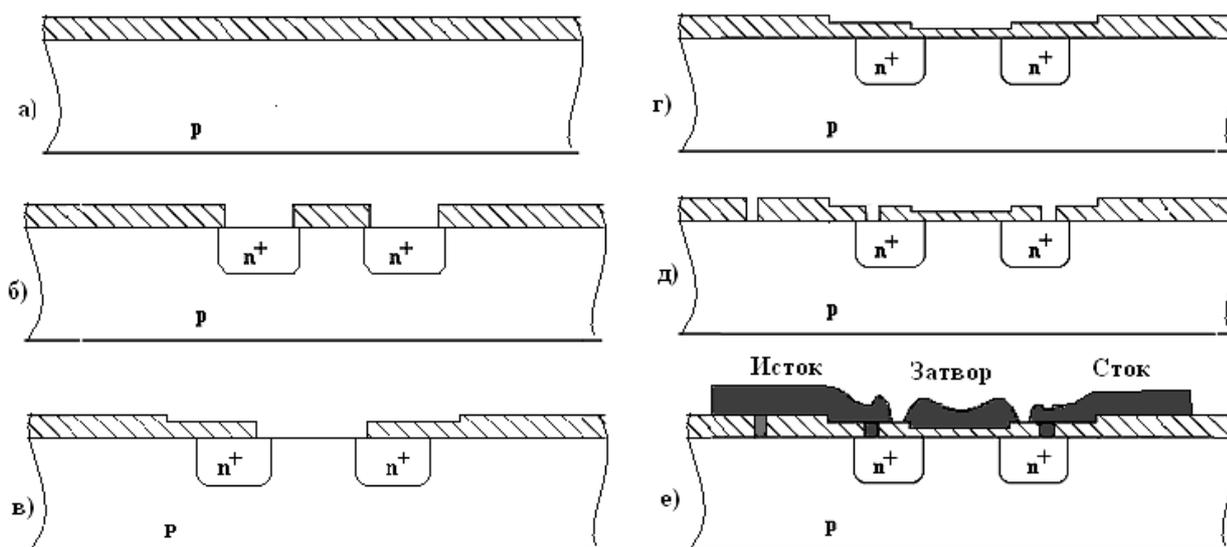


Рисунок 4.3 – Структура МОП – транзистора.

Последовательность операций будет следующая (для простоты опускаются многочисленные операции очистки, а также нанесение и удаления фоторезиста).

Сначала проводят общее окисление пластины (рисунок 4.3, а).

Затем при помощи операций фотолитографии и диффузии создают области  $n^+$  – истоков, стоков (рисунок 4.3, б).

Следующая операция – толстое окисление пластины (толщина окисла составляет 1 – 1,2 мкм). Благодаря созданию толстого окисла уменьшаются паразитные емкости, а также это дает некоторые другие преимущества. Затем проводят вторую фотолитографию – создают окна в толстом окисле под «подзатворное окисление» (рисунок 3, в).

Следом проводят подзатворное окисление. Режимы этого окисления: 450 °С сухого  $O_2$ . толщина подзатворного окисла 0,05 – 0,1 мкм (рисунок 4.3, г).

Далее следует третья фотолитография, на которой вскрывают окна в окисле для контактов, которые обеспечивают доступ к областям истока, стока и подложки (рисунок 3, д).

Затем проводят общее напыление алюминия на пластину и после четвертой фотолитографии получают рисунок металлической разводки и затворов (рисунок 4.3 е).

На рисунке 4.4 показана топология МОП – транзистора с алюминиевым затвором.

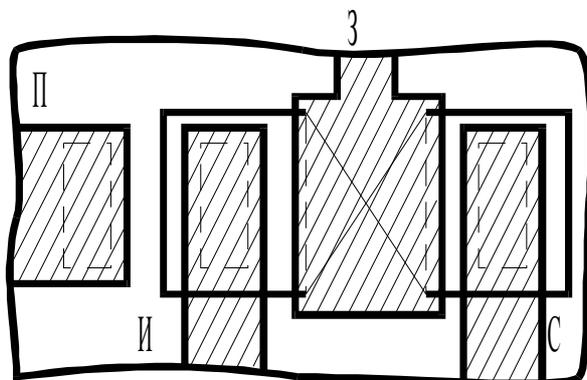


Рисунок 4.4 – Топология МОП – транзистора.

### 4.3 Технология гибридных интегральных микросхем

Значительные успехи, достигнутые за последние годы в области материалов, технологии, конструирования и схемотехники, позволили повысить качество и расширить области применения ГИС от промышленной автоматики до бытовой аппаратуры. Основным преимуществом ГИС является более простая и дешевая, по сравнению с полупроводниковой, технология изготовления, больший процент выхода годных изделий. Основным недостатком ГИС по сравнению с полупроводниковыми ИМС является относительно низкая плотность упаковки, низкая степень интеграции. Гибридные ИМС в зависимости от технологии изготовления делятся на толсто- и тонкопленочные. Понятия тонко- и толстопленочная технология характеризуют как толщину пленок, так и способы их нанесения и применяемые материалы.

#### 4.3.1 Изготовление тонкопленочных ГИС

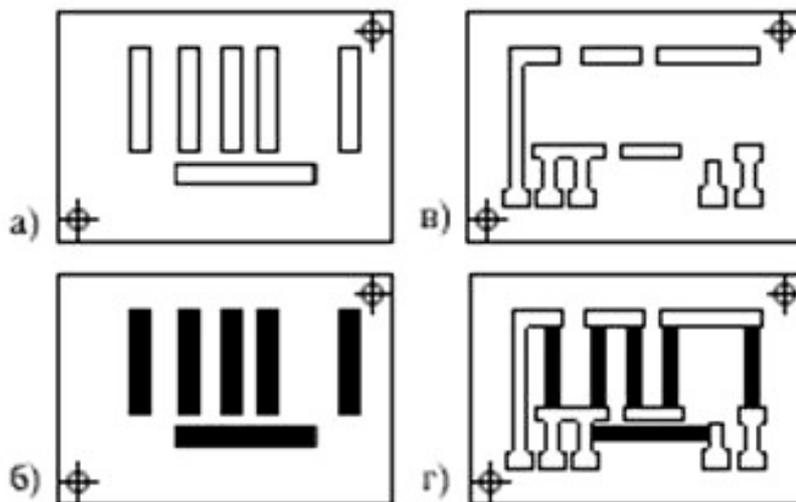
Требуемая конфигурация тонкопленочных элементов достигается двумя основными методами:

- съемной (свободной) маски;
- контактной маски.

Выбор метода зависит от способа нанесения пленки, требований по точности и воспроизводимости размеров пленочных элементов, производительности, стоимости.

4.3.1.1 Изготовление тонкопленочных структур методом свободных масок. Формирование пленочных элементов методом свободных масок заключается в напылении через маски слоев материалов с соответствующими свойствами (резистивные, диэлектрические, проводниковые).

Свободные маски – это биметаллические (бериллиевая бронза + никель) или диэлектрические пластины с отверстиями, форма, размеры и расположение, которых соответствуют пленочным пассивным элементам (рисунок 4.5). Благодаря использованию бериллиевой бронзы достигается высокая механическая прочность трафарета. Слой никеля позволяет повысить четкость кромок за счет меньшего подтравливания.



а – маска для резисторов; б – напыленные резисторы; в – маска для проводников; г – напыленные проводники

Рисунок 4.5 – Принцип метода свободных масок

Свободные маски изготавливаются в самостоятельном технологическом процессе (вспомогательное производство) и являются технологическим инструментом многоразового использования. Их можно закреплять, приводя в контакт с поверхностью подложек, а после нанесения пленок снимать и затем снова использовать. Толщина свободных масок около 80 – 100 мкм.

Свободные металлические маски для получения топологии элементов можно использовать только в сочетании с методами термовакуумного напыления и ионно-плазменного распыления. При получении тонких пленок методом катодного распыления применять металлические свободные маски нельзя, так как они искажают электрическое поле между катодом и анодом. В результате энергия бомбардирующих катод ионов аргона или другого ионизированного газа резко уменьшается, что приводит к значительному уменьшению скорости осаждения пленок или к полному прекращению процесса. Применение не искажающих электрическое поле свободных масок из диэлектрических материалов, например из фотоситалла, пока ограничено сложностью их технологии.

Изготовление тонкопленочных структур может выполняться в непрерывных и отдельных вакуумных процессах.

При непрерывных вакуумных процессах все технологические слои структуры получают в одной установке без разгерметизации вакуумной камеры.

Достоинства:

- исключается взаимодействие наносимых пленок с воздухом;
- общее время процесса напыления уменьшается.

Недостатки:

- непрерывный способ требует сложной внутрикамерной арматуры;
- затруднен межоперационный контроль пленок.

При отдельных вакуумных процессах каждая пленка наносится в отдельной вакуумной установке.

Достоинства:

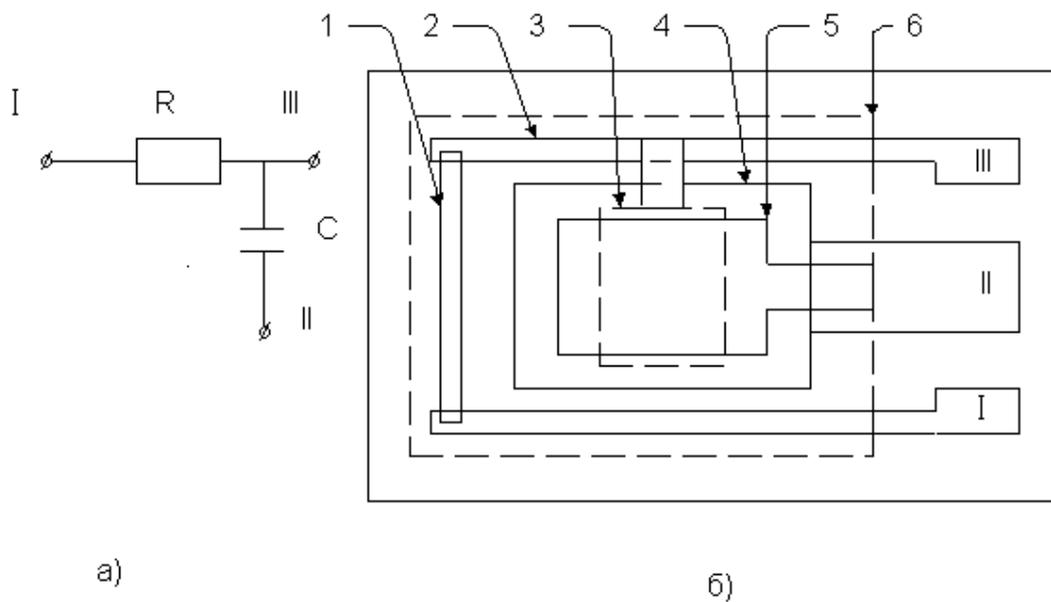
- уменьшается взаимное загрязнение пленок;

- внутрикамерные устройства более просты по сравнению с устройствами для непрерывного напыления;
- возможен межоперационный контроль;
- совмещение слоев упрощается, так как производится на воздухе.

Недостатки:

- возможность загрязнения пленок при переносе в следующие вакуумные камеры;
- длительность общего процесса из-за неоднократной откачки и герметизации.

Рассмотрим метод свободных масок на примере изготовления тонкопленочной структуры, состоящей из резистора и конденсатора (рисунок 4.6).



1 – резистор (хром); 2 – проводящие дорожки и контактные площадки (медь с подслоем хрома); 3 – нижняя обкладка конденсатора (алюминий); 4 – диэлектрик конденсатора (монооксид германия); 5 – верхняя обкладка конденсатора (алюминий); 6 – защитный слой (монооксид кремния)

Рисунок 4.6 – Принципиальная электрическая схема (а) и топология (б) тонкопленочной RC-ИМС

Первым напыляют резистивный слой. Во втором технологическом слое формируют разводку и контактные площадки. Следующий слой – нижняя обкладка конденсатора. Затем напыляют диэлектрик конденсатора и верхнюю обкладку. Последний слой – слой защиты.

4.3.1.2 Изготовление тонкопленочных структур с применением фотолитографии. Фотолитография – сложный и дорогостоящий процесс, поэтому ее применяют только тогда, когда с помощью свободных масок нельзя получить сложную топологию и высокую точность номиналов элементов. Кроме этого метод фотолитографии неприменим для формирования многослойных элементов, например конденсаторов.

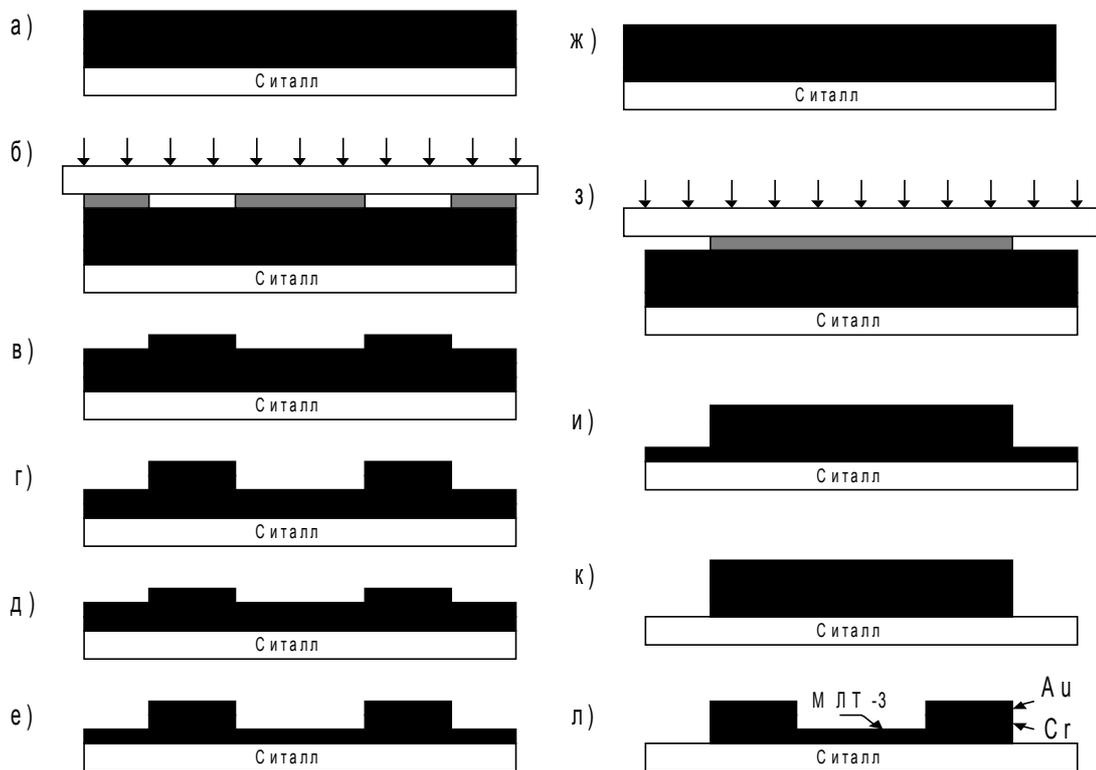
Схема изготовления тонкопленочных резисторов с помощью фотолитографии (рисунок 4.7) состоит из двух этапов. Сначала получают проводники и контактные площадки. Затем с помощью второй фотолитографии завершают формирование резисторов.

4.3.1.3 Материалы тонкопленочных ГИС. для резистивных пленок чаще всего используют хром, нихром (Ni — 80%, Cr — 20%), МЛТ сплавы, РС сплавы и кермет из смеси хрома и монооксида кремния (1:1). Метод напыления для этих материалов — термический (вакуумный).

Для обкладок конденсаторов используют алюминий, причем до напыления нижней обкладки (прилегающей к подложке) приходится предварительно напылять тонкий подслой из сплава CrTi, так как адгезия алюминия непосредственно с подложкой оказывается недостаточной.

Для диэлектрических слоев пленочных конденсаторов по совокупности требований (большая диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , малый тангенс угла потерь  $\text{tg}\delta$ , большая пробивная напряженность и др.) наибольшее распространение имеют монооксид кремния SiO и монооксид германия GeO.

Особое место среди диэлектриков занимают окислы Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, которые получают не методом напыления, а методом анодирования нижних металлических обкладок (Ta или Al).



а – нанесение сплошных пленок МЛТ-3, Cr, Au и формирование фотослоя; б – экспонирование; в – проявление; г – локальное травление пленки золота; д – удаление фотомаски; е – травление пленки хрома; ж – формирование фотослоя; з – экспонирование; и – проявление; к – локальное травление сплава МЛТ-3; л – удаление фотомаски

Рисунок 4.7 – Схема изготовления тонкопленочных ИМС с помощью фотолитографии

Подложки тонкопленочных ГИС должны прежде всего обладать хорошими изолирующими свойствами. Кроме того, желательны малая диэлектрическая проницаемость, высокая теплопроводность, достаточная механическая прочность. Температурный коэффициент расширения должен быть близким к температурным коэффициентам расширения используемых пленок. Типичные параметры подложек следующие: удельное сопротивление  $\rho = 10^{14}$  Ом·см; диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 5 - 15$ ; тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = (2 - 20) \cdot 10^{-4}$ ; температурный коэффициент линейного расширения  $\text{TK}_L = (5 - 7) \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ .

В настоящее время наибольшее распространение в качестве подложек имеют ситалл и керамика. Ситалл представляет собой кристаллическую разновидность стекла (обычное стекло аморфно), а керамика — смесь окислов в стекловидной и кристаллической фазах (главные составляющие  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$ ).

Защита тонкопленочных элементов обеспечивается пленками монооксида кремния, оксидами алюминия и тантала, фоторезистом, дополнительным слоем припоя, полимерными пленками, например пленкой эпоксидной смолы.

Обычно ГИС, как и полупроводниковые ИС, изготавливаются групповым методом на ситалловых или иных пластинах большой площади.

В качестве навесных компонентов используются бескорпусные диоды, транзисторы, а также бескорпусные ИМС и БИС.

#### 4.3.2 Изготовление толстопленочных ГИС

До недавнего времени при создании СВЧ-ИМС предпочтение отдавали тонкопленочным структурам. В настоящее время созданы ИМС на толстых пленках, работающие в диапазоне частот 1 – 18 ГГц. Толстопленочные ГИС выгодны при умеренно высоких мощностях рассеивания ( $2,5 - 4,0 \text{ Вт/см}^2$ ), а также когда число резисторов велико, а число активных элементов сравнительно мало.

Преимущества толстопленочной технологии перед тонкопленочной:

- толстопленочная технология менее дорогостоящая (ниже стоимость производственных помещений, оборудования и материалов, меньше нерациональный расход материалов, высокий выход годных, достигающий 80 – 100%);

- толстопленочная технология технически более проста, не требует высококвалифицированных операторов;

- толстопленочная технология менее чувствительна к загрязнениям окружающего воздуха (толщина пленок во много раз превышает размеры загрязняющих частиц);

– в толсто пленочной технологии возможны контроль и исправление брака после каждой операции;

– толсто пленочные элементы могут работать в жестких условиях от  $-180^{\circ}\text{C}$  до  $+300^{\circ}\text{C}$  при резком перепаде температур, что не выдерживают тонко пленочные элементы;

– относительно большая толщина пленок от 12 мкм до 25 мкм позволяет уменьшать вредные наводки и паразитные емкости;

– толстые пленки выдерживают высокое рассеяние энергии и поэтому предпочтительнее при изготовлении мощных ИМС.

4.3.2.1 Материалы толсто пленочных ГИС. Исходными материалами для формирования толсто пленочных элементов являются пасты. Они содержат три основных компонента: функциональную, конструкционную и технологическую составляющие.

Функциональная составляющая придает пасте необходимые (проводниковые, резистивные, диэлектрические) свойства.

Для проводниковых паст в качестве функциональной основы используют: серебро, палладий, золото, системы и сплавы на их основе, а также неблагородные металлы: медь, никель, алюминий, молибден. Они обеспечивают не только меньшую стоимость паст, но и в ряде случаев лучшие параметры и стабильность при высоких температурах. Медь, например, является единственным металлом с высокой электропроводностью, к которому можно подсоединять внешние выводы как сваркой, так и пайкой. Кроме того, медь имеет хорошую адгезию к алюмокерамическим подложкам, высокие теплопроводность, стойкость к выщелачиванию, радиации и хорошие свойства в диапазоне СВЧ.

Для резистивных паст широко используют: палладий и оксид серебра (серебряно-палладиевая паста); оксид рутения; рутенаты свинца и висмута; оксиды таллия, кадмия, индия.

Диэлектрические пасты для конденсаторов в качестве функциональной составляющей содержат порошки сегнетоэлектриков, например титаната бария  $\text{BaTiO}_3$ , оксид иттрия  $\text{Y}_2\text{O}_3$  для СВЧ ИМС.

Пасты для межслойной изоляции и защиты изготавливают на основе стекол, ситаллоцементов.

Конструкционная составляющая обеспечивает равномерное распределение функциональных частиц и адгезию пленки к подложке, в процессе формирования пленки не удаляется и остается в готовом элементе. Наиболее широко применяются свинцовоборосиликатные стекла.

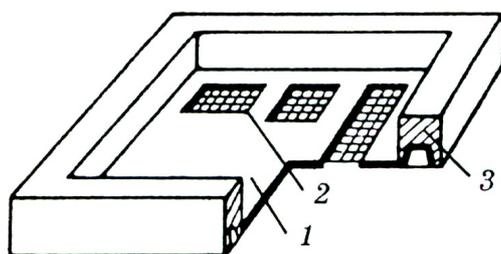
Технологическая составляющая – это временные органические связующие и растворители, которые вводятся для обеспечения равномерного распределения компонентов в процессе приготовления пасты, для получения определенной консистенции и придания пасте оптимальной вязкости. После нанесения пасты на подложку они полностью удаляются в процессе термообработки.

Подложки для толстоленочных структур в основном изготавливаются из алюмокерамики марки 22ХС, состоящей из оксидов: алюминия – 94,4%, кремния – 2,76%, марганца – 2,35%, хрома – 0,49%.

4.3.2.2 Толстоленочная технология. Основу толстоленочной технологии составляет трафаретная печать, число повторений которой в процессе изготовления ИМС соответствует количеству технологических слоев.

Трафаретная печать – процесс нанесения паст соответствующего состава через сетчатые трафареты. Процесс осуществляется на специальных печатных автоматах.

Сетчатые трафареты представляют собой тонкую сетку из капрона или нержавеющей стали, натянутую на дно рамки (рисунок 4.8).

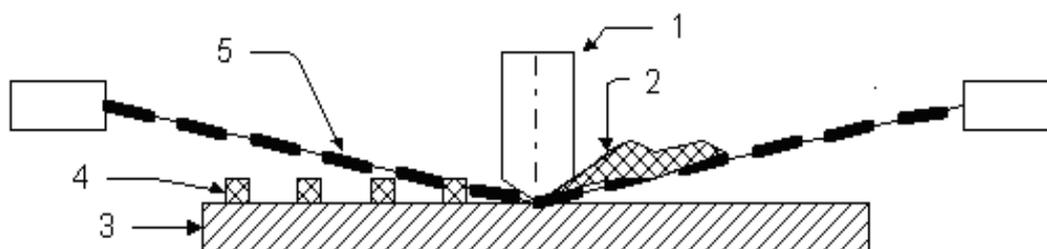


1 – пленка, 2 – окна, 3 – рамка

Рисунок 4.8 – Сетчатый трафарет

Размер ячеек сетки – около 100 мкм, диаметр нитей — около 50 мкм. Большая часть сетки покрыта полимерной пленкой, но в пленке имеются окна. Рисунок окон получают методом фотолитографии, вытравливая отверстия в пленке

Нанесение паст производят следующим образом. Сетчатая маска располагается на фиксированном расстоянии от подложки. Подложка закрепляется с помощью механического держателя или вакуумного прижима. Продавливание пасты сквозь отверстия маски осуществляется с помощью специальной лопаточки – ракеля (рисунок 3.29). Лезвие ракеля изготавливают из прочных и упругих материалов, стойких к воздействию органических растворителей. Наиболее широко используют полиуретан и фторкаучук. Угол ракеля при вершине составляет  $90^{\circ}$  или  $60^{\circ}$ . Перемещаясь по поверхности маски, ракель гонит впереди себя волну пасты и одновременно надавливает на маску. Маска прогибается и касается подложки. Под действием возникающего гидромеханического давления паста заполняет отверстия сетки в местах касания с подложкой и продавливается. По мере ухода ракеля маска выпрямляется, оставляя на подложке рисунок нанесенной пасты.



1 – ракель; 2 – паста; 3 – подложка; 4 – отпечаток пасты; 5 – маска

Рисунок 4.9 – Схема процесса трафаретной печати

Термообработка паст включает две операции: сушку и вжигание.

Сушка необходима для постепенного удаления из пасты летучих компонентов. Сушку проводят при температуре  $80 - 150^{\circ}\text{C}$  в течение  $5 - 15$  мин в печах или под инфракрасными лампами.

Вжигание паст проводят в конвейерных электропечах непрерывного действия. При вжигании происходит выжигание из пасты органической связки (300 – 350 °С, 15 – 20 мин) и спекание паст (700 – 1000 °С в зависимости от типа паст, 30 мин).

Частицы паст в процессе термообработки спекаются, образуя более крупные зерна.

Защита толсто пленочных элементов. Для защиты толсто пленочных элементов от влаги и окружающей среды применяют глазуревые покрытия, которые такие наносят методом трафаретной печати. Наиболее широко применяют низкотемпературные стекла с большим содержанием свинца. Для удобства сборки различные структуры защищают пастами разного цвета.

#### **4.4 Контрольные вопросы**

1. Охарактеризуйте основные этапы технологического процесса изготовления биполярного транзистора.
2. В чем заключаются преимущества МОП–технологии?
3. Перечислите наиболее ответственные операции при изготовлении МОП – интегральных микросхем
4. Охарактеризуйте основные этапы технологического процесса изготовления МОП – транзистора.
5. Какие методы применяются при изготовлении тонкопленочных микросхем?
6. Дайте определение непрерывным и отдельным вакуумным процессам?
7. Что лежит в основе метода свободных масок?
8. Перечислите основные этапы изготовления тонкопленочных микросхем по методу свободных масок.
9. В чем сущность метода трафаретной печати?
10. Охарактеризуйте материалы, применяемые для изготовления толсто пленочных ГИС.
11. Перечислите достоинства толсто пленочных микросхем.

## 5 Сборка микросхем

Основными сборочными операциями при изготовлении ИМС, являются:

- 1) разделение пластин и подложек на кристаллы и модули;
- 2) крепление кристаллов и модулей к корпусу ИМС (крепление навесных активных элементов к основанию модуля ГИС);
- 3) присоединение токоведущих выводов;
- 4) герметизация ИМС;
- 5) контроль электрических параметров и проведение испытаний;
- 6) заключительные операции сборки ИМС (окраска, лакировка, маркировка, лужение выводов).

### 5.1 Разделение пластин и подложек

После автоматического зондового контроля электрических параметров готовых структур ИМС пластины или подложки разделяют на единичные структуры: кристаллы или платы. Операция разделения, как правило, состоит из двух основных частей: скрайбирование и ломка.

5.1.1 Скрайбирование – это процесс нанесения ослабляющих рисок. Для этого пластины или подложки помещают на липкие эластичные ленты.

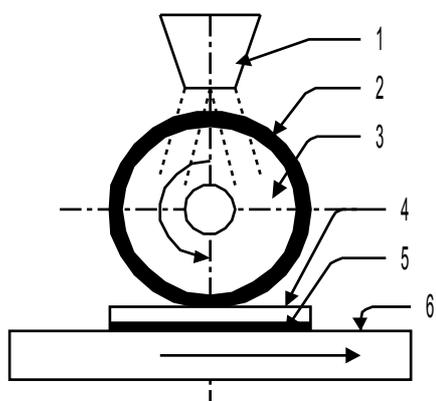
Для скрайбирования подложек и пластин применяют:

- абразивную резку (диском с внешней режущей кромкой (рисунок 5.1), алмазным резцом (рисунок 5.2));
- обработку лазерным лучом (образование рисок происходит в результате испарения материала сфокусированным лазерным лучом большой мощности);
- химическое травление (с помощью V – канавок).

Основной недостаток механического скрайбирования — неровный (рваный) край реза, который приводит при ломке к сколам и другим дефектам.

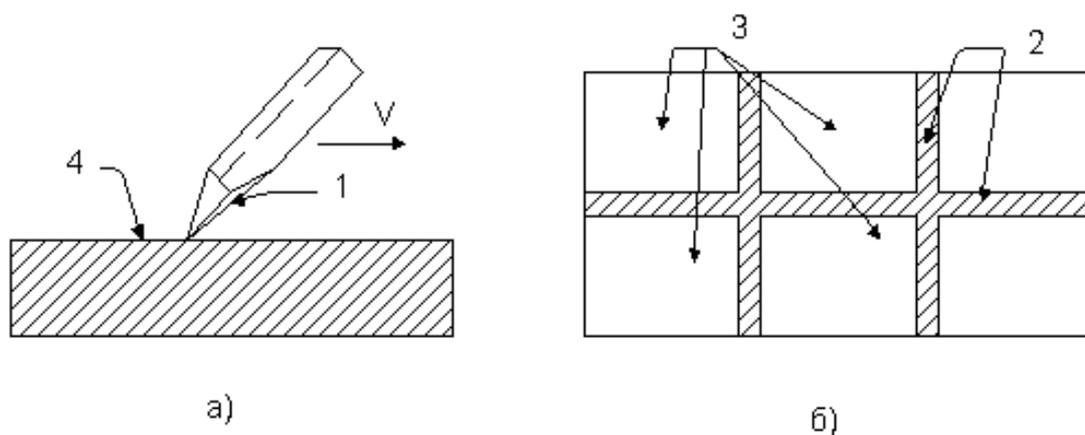
Преимущества метода механического скрайбирования: – малая ширина риски, что позволяет более эффективно использовать площадь пластины

полупроводникового материала, высокая производительность, возможность быстрой переналадки оборудования.



1 – сопло подачи смазывающе-охлаждающей жидкости; 2 – режущая кромка диска; 3 – основа диска; 4 – разрезаемая пластина; 5 – клеящий материал; 6 – оправка для закрепления пластины

Рисунок 5.1 – Схема резки диском с внешней алмазосодержащей режущей кромкой



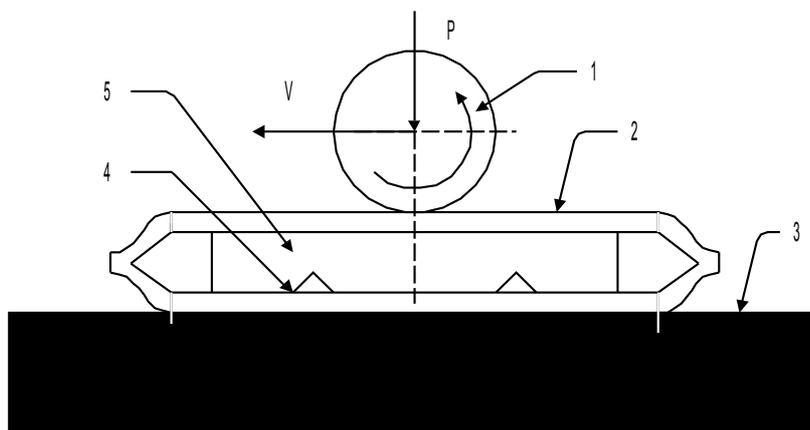
а – нанесение рисок; б – подложка с рисками; 1 – режущая грань резца; 2 – линии реза; 3 – отдельные платы; 4 – подложка

Рисунок 5.2 – Скрайбирование алмазным резцом

Более перспективным является метод лазерного скрайбирования. Риски (более широкие, чем при механическом скрайбировании) при лазерном скрайбировании получаются с гладкими ровными краями, поэтому качество последующей ломки более высокое.

5.1.2 Разламывание пластин. После скрайбирования пластины или подложки разламывают по ослабленным рисками линиям.

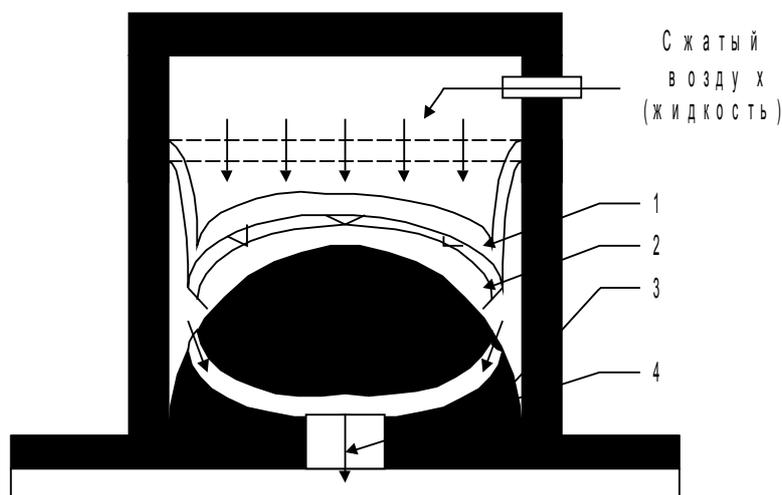
– разламывание цилиндрическим валиком: по пластине или подложке, расположенной на толстом пружинящем основании – резине (рисунок 5.3) прокатывают цилиндрическим валиком по двум перпендикулярным направлениям.



1 – ролик; 2 – пленка полиэтилена; 3 – опора; 4 – линия разделения; 5 – пластина

Рисунок 5.3 – Разделение скрайбированных пластин с помощью подпружиненного ролика

– разламывание на полусфере (рисунок 5.4): производят обжатие пластины по сферической поверхности с помощью хорошо растягивающейся эластичной мембраны.



1 – гибкая мембрана; 2 – пластина; 3 – полусфера; 4 – выход воздуха

Рисунок 5.4 – Разделение скрайбированных пластин на полусфере

После разламывания и контроля кристаллов и плат по внешнему виду (наличие сколов и трещин) кристаллы и платы поступают на операцию монтажа.

## 5.2 Монтаж кристаллов и плат

Присоединение кристаллов к основанию корпуса или на подложку модуля ИМС осуществляется пайкой эвтектическими припоями, приклеиванием токопроводящими и нетокопроводящими клеями и с помощью стекол.

При выборе способа крепления кристаллов принимают во внимание конструктивные особенности ИМС, ее электрические и тепловые характеристики, тип корпуса и другие показатели.

5.2.1 Пайка – процесс получения неразъемного соединения деталей путем нагрева и последующего охлаждения при наличии между ними промежуточного материала - припоя называется пайкой.

При нагреве до температуры плавления припоя между ним и соединяемыми деталями одновременно происходят:

- 1) растворение соединяемых материалов в жидком припое;

2) диффузия припоя в соединяемые материалы с образованием твердого раствора;

3) химическое взаимодействие припоя с материалами соединяемых деталей с образованием интерметаллических соединений.

Качество паяного соединения определяется: способом и режимом пайки (максимальная температура, скорость нагрева, время выдержки при максимальной температуре, давление на соединяемые детали, скорость охлаждения деталей), подготовкой поверхностей.

Присоединение пайкой производится, в основном, эвтектическими припоями систем Au—Si, Au—Ge, температура плавления которых не превышает 375 °С. Иногда используются и низкотемпературные припои систем Pb—Sn, Pb-Sn—Bi, Sn—Bi. Применение низкотемпературных припоев требует специальной обработки тыльной поверхности пластин (кристаллов), т.е. нанесения металлических пленок, способных к облуживанию (например, структур V + Cu, Cr + Au). Хорошие результаты при пайке дает наложение УЗ – колебаний (УЗ – пайка).

Припои для выполнения пайки применяют в виде таблеток, прокладок, покрытий на соединяемые детали или локальные участки. Пайка совместима с толстопленочной технологией, припойные пасты можно наносить трафаретной печатью.

Качество пайки повышают флюсы. Флюсы в процессе пайки удаляют поверхностные оксиды, предотвращают новое окисление и повышают смачиваемость поверхностей припоем. При изготовлении микросхем применяются бескислотные антикоррозийные флюсы на основе канифоли марок ФКСп, ФПЭт, ФКТС и на основе хлористого цинка ФХЦ.

Достоинствами пайки являются простота процесса, наличие хороших электрического и теплового контактов между кристаллом и корпусом, отсутствие расплавления и относительно невысокий нагрев соединяемых деталей, возможность соединения деталей сложной конфигурации. После пайки можно разъединять детали без разрушения их конструкции.

Для выполнения операций сборки микросхем применяют пайку в водородных печах; электропаяльником; за счет теплопередачи от импульсно-нагреваемого электрическим током инструмента; ультразвуком; электросопротивлением за счет джоулева тепла, выделяемого в месте соединения деталей; погружением в припой; излучением.

5.2.2 Соединение стеклами обеспечивают хорошее согласование по ТКЛР, отличаются низкой стоимостью. Основные недостатки соединений стеклом: отсутствие электрического контакта, плохой теплоотвод, высокая температура размягчения стекла (около 500 °С). Для часто используемых сочетаний материалов подсоединяемых деталей стекла с нужным ТКЛР, как правило, тугоплавкие, т. е. непригодны для монтажа кремниевых кристаллов. В связи с этим соединения стеклом применяют в основном при монтаже плат из ситалла, поликора и керамики.

5.2.3 Приклеивание—это процесс соединения элементов друг с другом, основанный на клеящих свойствах некоторых материалов, которые позволяют получать механически прочные соединения между элементами и основаниями. Для получения соединений клей дозированно наносят на поверхности, приводят их в контакт и при наличии или без сжимающих усилий производят отверждение клея.

Соединения клеями довольно широко применяются при сборке, так как отличаются простотой процесса, низкими температурами отверждения и достаточными механической прочностью и надежностью.

Склеиванием можно соединять разнообразные материалы. Клеевые соединения упрощают конструкцию, уменьшают массу, экономят расход дорогостоящих металлов.

Недостатки клеевых соединений: низкая теплопроводность, невозможность замены дефектных структур, перегрев при подсоединении электродных выводов, возможно выделение газов в герметичный корпус.

Прочность клеевого соединения зависит от качества подготовки склеиваемых поверхностей, толщины клея, правильности выбора режима сушки (печная комнатная), качества клея.

Перед склеиванием поверхности тщательно очищают от загрязнений.

Количество дефектов в слое клея увеличивается с его толщиной, прочность соединения уменьшается.

Различают токонепроводящие и токопроводящие клеи (содержат металлический наполнитель).

Токонепроводящие клеи обеспечивают высокую механическую прочность соединений. Соединения с помощью токопроводящих клеев обладают большей электропроводностью, но меньшей механической прочностью.

Для операций сборки применяют клеи на основе эпоксидных смол, полиимида и др.

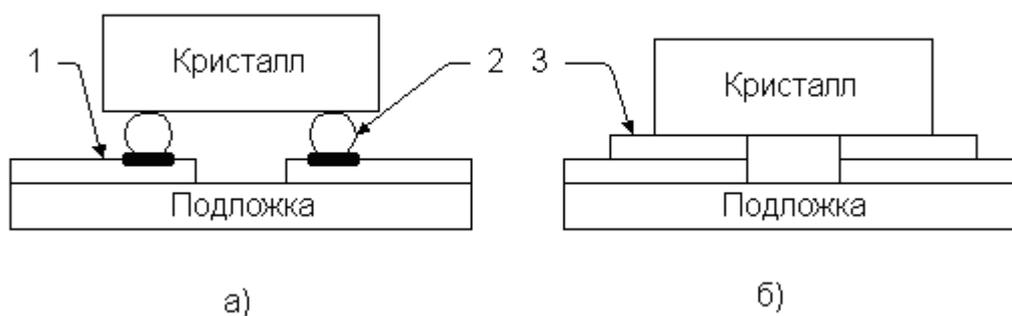
5.2.4 Монтаж кристаллов и плат может быть прямым и перевернутым.

1) Метод прямого монтажа.

Рабочей поверхностью вверх подсоединяют структуры ИМС к основаниям корпусов, посадочным площадкам выводных рамок или лент, к пассивной части ГИМ или к дополнительным контактным площадкам.

2) Метод "перевернутого кристалла".

Кристаллы с объемными выводами, входящие в состав ГИС или микросборок, монтируют на пассивную часть рабочей стороной вниз. С помощью объемных выводов одновременно подсоединяются и кристалл, и все выводы (рисунок 5.5).



1 – контактная площадка; 2 – шариковый вывод; 3 – балочный вывод

Рисунок 5.5 – Монтаж кристаллов с шариковыми выводами (а) и балочными (б) выводами

К достоинствам монтажа с помощью жестких объемных выводов относится: сокращение числа соединений вдвое, что повышает надежность изделия при эксплуатации; сокращение трудоемкости за счет одновременного присоединения всех выводов; уменьшение монтажной площади до площади, занимаемой кристаллом; отсутствие необходимости предварительного механического крепления кристалла.

Основная трудность – совмещение выводов с контактными площадками. Присоединения выводов выполняется с помощью зеркальной оптики и проектора или с помощью направляющей фильеры. Совмещение перевернутых кристаллов с балочными выводами выполнять проще, так как они выходят за пределы кристалла.

### **5.3 Присоединение электродных выводов**

Электродные выводы осуществляют электрическое соединение между структурами и внешними выводами готовых ИМС.

Сюда относятся соединения:

- омических контактов активных навесных элементов с пленочными контактными площадками пассивной части ГИМ;
- контактных площадок структур ИМ с внешними выводами корпусов;
- контактных площадок с контактными площадками (или объемными выводами) многокристалльных ИМС.

В зависимости от применяемых средств различают проволочный и беспроводный монтаж. Соответственно используются два типа выводов: гибкие (проволочные) и жесткие (балочные, шариковые). Гибкие выводы создаются индивидуальной обработкой. Жесткие – индивидуальной и групповой.

Основные требования к контактным выводам и методам их создания:

- достаточная прочность (не ниже 70% прочности присоединяемой проволоки);
- малое омическое сопротивление контакта;

– высокая линейность вольт - амперной характеристики контакта металл-полупроводник;

- высокая производительность процесса контактирования;
- возможность автоматизации

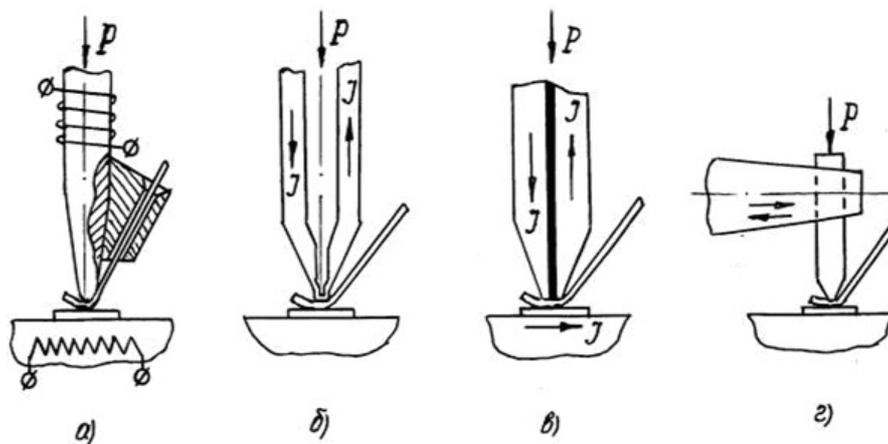
В качестве материала для гибких выводов используются проволока из золота (ЗЛ 999), диаметром от 25 до 60 мкм, меди (марки МО), диаметром от 50 до 120 мкм и алюминия(А99), диаметром от 50 до 100 мкм. При монтаже толсто пленочных ГИС используют медную луженую проволоку диаметром от 100 до 150 мкм.

Материалом жестких выводов служит гальваническая медь с подслоем ванадия.

Для присоединения выводов в ИМС применяются следующие методы:

- термокомпрессионная сварка (ТКС);
- сварка давлением с косвенным импульсным подогревом (СКИН);
- электроконтактная односторонняя сварка (ЭКОС) или сварка сдвоенным («расщепленным») электродом;
- ультразвуковая сварка (УЗС);
- пайка (индивидуальная и групповая).

5.3.1 Сварка. Способ нагрева зоны соединения находит свое отражение в конструкции сварочного инструмента, схематически представленного на рисунок 5.6.



а – ТКС; б – СКИН; в – ЭКОС; г – УЗС.

Рисунок 5.6 – Виды микросварки. Разновидности сварочного инструмента

Термокомпрессионная сварка (рисунок 5.6, а) осуществляется при одновременном приложении давления и подогрева к соединяемым материалам. При этом за счет нагрева повышается способность свариваемых материалов к упругой и пластической деформации. А приложение давления способствует разрушению окисных пленок (например, в системе Al—Si, пленок SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Как следует из экспериментальных исследований, оптимальное давление находится в диапазоне (7 – 15) 10<sup>7</sup> Па. Температура сварки – 350 – 450 °С. Время сварки для различных систем находится в пределах от 1 до 10 с.

В случае сварки с косвенным импульсным подогревом (рисунок 5.6, б) разогрев зоны соединения осуществляется только в момент сварки. Это достигается V-образной конструкцией инструмента, через который пропускается амплитудно-модулированный импульс тока с несущей частотой 0,5 – 1,5 кГц. В результате температуру зоне сварки можно повысить до 650 °С. Инструмент является частью электрической цепи. При этом торцовая часть инструмента, находящаяся в контакте со свариваемой системой, нагревается. Происходит локальный разогрев места сварки.

Инструмент для ЭКОС (рисунок 5.6, в) часто называют расщепленным. Он состоит из двух частей, разделенных изолирующей термостойкой прокладкой, которые являются составной частью электрической цепи. Последняя замыкается лишь при контакте с перемычкой. Таким образом, импульс тока проходит через свариваемый участок перемычки, причем тепло выделяется в зоне контакта. Качество сварки зависит от начального контактного электрического сопротивления и сопротивления свариваемых материалов. В установках для ЭКОС предусмотрено автоматическое измерение контактного сопротивления, регулирование по сопротивлению усилия и формирование параметров импульса тока, что повышает воспроизводимость характеристик соединения. Энергия для нагрева подается в виде импульсов тока длительностью 0,01 с. Температура в зоне сварки составляет до 800 °С.

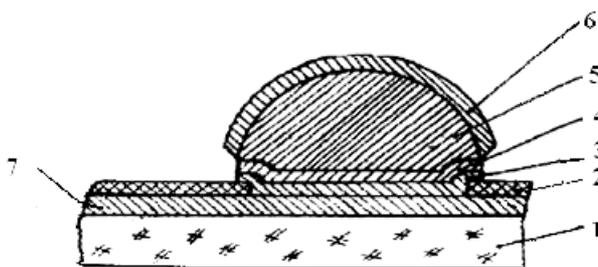
Ультразвуковая сварка (рисунок 5.6, г) может выполняться без специально организованного нагрева, т.к. тепло, необходимое для повышения пластичности,

выделяется в результате трения перемишки о площадку. В процессе УЗС на рабочий инструмент накладываются продольные УЗ – колебания частотой не более 50 кГц, амплитудой до 10 мкм. При этом облегчается процесс разрушения и удаления из зоны контакта окисных пленок, смятие (деформация) микровыступов, увеличение площади фактического касания. Сцепление возрастает. Поэтому с помощью УЗ – сварки можно соединить даже те системы, которые не свариваются термокомпрессией.

Основная тенденция развития методов сварки в микроэлектронике – локализация тепла в зоне соединения и уменьшение теплового воздействия на изделие в целом, что позволяет повысить температуру сварки и применять менее пластичные материалы.

5.3.2 Пайка Соединение пайкой в настоящее время начали широко использовать при монтаже ИМС с шариковыми (столбиковыми) выводами и в толстопленочных ИМС. Переход на жесткие (беспроволочные) выводы при монтаже ИМС обусловлен необходимостью повышения надежности изделий микроэлектроники.

Шариковые выводы формируются на заключительном этапе техпроцесса изготовления ИМС. Структура шарикового вывода показана на рисунке 5.7.

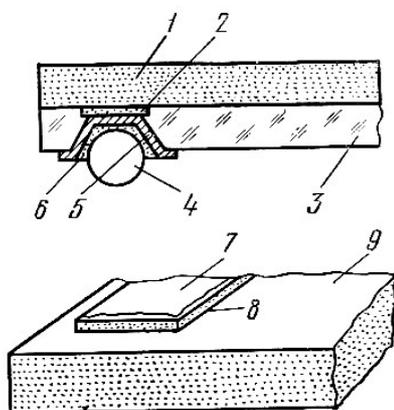


1 – подложка ИМС; 2 – диэлектрик  $\text{SiO}_2$ ; 3 – адгезионный слой (ванадий); 4 – напыленный слой меди; 5 – электролитически осажденная полусфера из меди; 6 – слой припоя, 7 – слой металлизации

Рисунок 5.7 – Структура жестких объемных выводов на кристалле ИМС

На контактную площадку ИМС наносится адгезионный слой ванадия и проводящий слой меди толщиной 1,5 – 2 мкм вакуумно – термическим напылением, затем электролитическим осаждением выращивается полусферический выступ из меди высотой 20 – 25 мкм, а на этот выступ осаждается электролитический слой припоя системы олово – висмут толщиной 5 – 10 мкм. Общая высота выступа 27 – 35 мкм.

В отличие от проволочного и ленточного монтажа объемные выводы соединяют с площадками платы пайкой, а кристалл при этом оказывается в перевернутом положении, т.е. структурами вниз (рисунок 5.8).



1 – кристалл; 2 – контактная площадка; 3 – стекло; 4 – шарик медный; 5 – медная подушка; 6 – припой (высокотемпературный); 7 – припой (низкотемпературный); 8 – вывод из сплава AgPb; 9 – подложка

Рисунок 5.8 – Монтаж кристалла на плате с помощью объемных выводов

К достоинствам монтажа с помощью жестких объемных выводов относится: сокращение числа соединений вдвое, что повышает надежность изделия при эксплуатации; сокращение трудоемкости за счет одновременного присоединения всех выводов; уменьшение монтажной площади до площади, занимаемой кристаллом; отсутствие необходимости предварительного механического крепления кристалла.

## 5.4. Герметизация микросхем в корпус

Герметизация ИМС используется для изоляции кристаллов от воздействия агрессивных факторов внешней среды. Герметизация интегральных схем может быть осуществлена либо путем их корпусирования, либо бескорпусной герметизацией.

Герметизация в корпусе предполагает предварительное изготовление корпусов определенной конструкции с основанием для крепления кристалла, изолированными выводами, крышкой и вспомогательными деталями, в процессе бескорпусной герметизации кристалл с внешними выводами заливается полимерным компаундом. В методе комбинированной герметизации предварительно изготавливают капсулы, в которые устанавливают сборку кристалла с выводами, а затем эту конструкцию заливают герметизирующим компаундом.

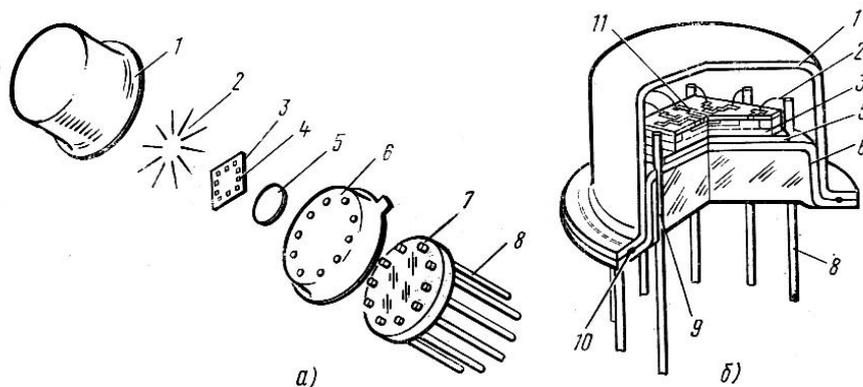
5.4.1 Корпусная герметизация. Корпуса служат для защиты ИМС от механических, климатических и других воздействий.

Важнейшие требования, которым должна удовлетворять конструкция корпуса, сводятся к следующему:

- а) защита ИМС от влияния окружающей среды и механических воздействий;
- б) поддержание чистоты и стабильности атмосферы, окружающей ИМС;
- в) обеспечение удобства и надежности монтажа;
- г) отвод тепла от ИМС, размещенной внутри корпуса;
- д) обеспечение надежного электрического соединения контактных площадок ИМС с выводами корпуса;
- е) обеспечение надежного крепления корпуса при монтаже в аппаратуре.

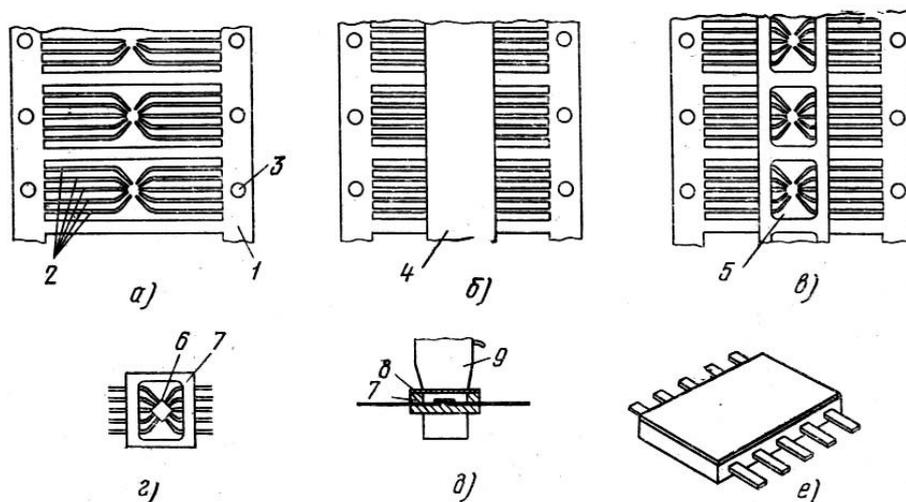
Кроме того, конструкция корпуса должна иметь высокую надежность, обладать коррозионной и радиационной стойкостью, а также быть простой и экономичной в изготовлении.

Для этого используются различные методы и способы герметизации в специальных корпусах (рисунки 5.9, 5.10).



1 – баллон; 2 – соединительные проводники; 3 – кристалл; 4 – контактные площадки; 5 – припой; 6 – колпачёк ножки; 7 – стекло; 8 – выводы; 9 – спай выводов со стеклом; 10 – соединение электроконтактной сваркой баллона и ножки; 11 – слой металлизации

Рисунок 5.9 – Схема сборки (а) и разрез ИМС (б) в круглом корпусе



1 – лента-носитель; 2 – выводы (после травления); 3 – перфорация для перемещения ленты; 4 – стеклянная лента-припой; 5 – полость корпуса ИС; 6 – кристалл с готовыми структурами; 7 – корпус; 8 – крышка; 9 – нагревательный инструмент

Рисунок 5.10 – Схема сборки ИС на ленте носителя в пластмассовом корпусе

Корпуса ИМС классифицируют по форме и расположению выводов и по используемому для изготовления материалу.

Телом корпуса называют часть корпуса без выводов, ограниченную габаритными размерами; установочной плоскостью — плоскость, на которую устанавливаются корпуса ИМС; плоскостью основания корпуса — плоскость, проходящую через нижнюю точку корпуса параллельно установочной плоскости.

По форме проекции тела корпуса на плоскость основания корпуса подразделяются на четыре типа. Корпуса типов 1, 2 и 4 в проекции на плоскость основания имеют прямоугольную форму, а корпуса типа 3 аналогичны по форме корпусам маломощных транзисторов, отличаясь большим числом выводов (рисунок 5.10). Корпуса типа 1 имеют штыревые выводы на торцевой поверхности большей стороны. Корпуса типа 2 имеют штыревые выводы на торцевых поверхностях больших сторон, изогнутые перпендикулярно поверхности корпуса (корпуса типа DIP). Корпуса типа 4 имеют планарные выводы относительно поверхности корпуса.

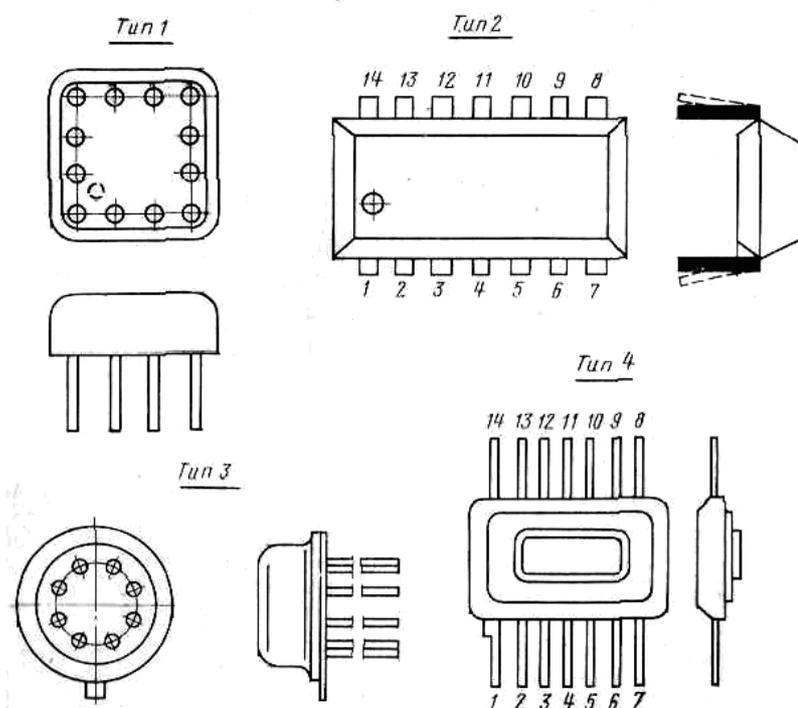


Рисунок 5.10 – Типы корпусов интегральных схем.

Корпуса ИМС, относящиеся к одному и тому же типу, могут различаться по размерам и количеству выводов. Габаритные и присоединительные размеры каждого типа корпусов строго стандартизованы. По габаритным и присоединительным размерам типы корпусов подразделяются на типоразмеры. Выбор того или иного типоразмера корпуса определяется в первую очередь требованиями к качеству герметизации, а также к электрической и механической прочности, тепловому сопротивлению, объему, массе и методу монтажа на печатной плате.

Классификация корпусов по внешнему конструктивному оформлению приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Типы корпусов

Тип	Форма проекции тела корпуса на плоскость основания	Расположение проекции выводов на плоскости основания	Расположение выводов относительно плоскости основания
1	Прямоугольная	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное
2	Прямоугольная	За пределами проекции тела корпуса	Перпендикулярное
3	Круглая или овальная	В пределах или за пределами тела корпуса	Перпендикулярное
4	Прямоугольная	За пределами проекции тела корпуса	Параллельное

В зависимости от применяемых материалов корпуса подразделяются на стеклянные, керамические, металлокерамические, металлостеклянные, пластмассовые. Стеклянные и керамические корпуса отличаются от металлостеклянных и металлокерамических тем, что в их конструкцию из металлических деталей входят только выводы.

Стеклянные, металлостеклянные, керамические и металлокерамические корпуса обеспечивают вакуум-плотную герметизацию в условиях длительного воздействия механических нагрузок, тропической влажности и изменения температуры окружающей среды от  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Количественной оценкой качества герметизации является скорость натекания, которая в вакуум-плотных

корпусах составляет  $10^{-7}$ —  $10^{-8}$  см<sup>3</sup>/с. При менее жестких условиях эксплуатации целесообразно использовать более простые по конструкции и технологии металлополимерные корпуса.

Герметизацию ИМС, предназначенных для работы в обычных условиях (бытовая радиоэлектронная аппаратура, цифровые вычислительные и управляющие устройства промышленной электроники), можно производить с помощью пластмассовых корпусов. Герметичность таких корпусов является достаточно низкой, что, прежде всего, обусловлено трудностью получения герметичного соединения между пластмассой и металлическими выводами, так как коэффициенты термического расширения их отличаются примерно на порядок

5.4.2 Бескорпусная герметизация. Применение ИМС первой степени интеграции в микроэлектронной аппаратуре приводит к значительной потере полезного объема и увеличению массы блока за счет индивидуальных корпусов ИМС. Использование такого вида элементной базы вполне оправдано при не очень строгих требованиях, предъявляемых к массе и габаритам устройства. Однако при разработке целого ряда радиоэлектронной аппаратуры (авиационной, космической и др.) вопросы всестороннего учета массы, объема и надежности являются определяющими. В такой аппаратуре в качестве элементной базы применяются БГИС, навесными элементами которых являются бескорпусные полупроводниковые ИМС. В настоящее время серийно выпускается много типов бескорпусных ИМС с гибкими и жесткими выводами.

При хранении, транспортировке, а также во время проведения сборочных операций БГИС поверхность кристалла бескорпусной ИМС подвержена воздействию окружающей среды. Вследствие адсорбции газов и влаги поверхностью полупроводника изменяются его электрофизические свойства (поверхностная проводимость, поверхностная рекомбинация, поверхностный заряд и др.). Изменение состояния поверхности оказывает сильное влияние на электрические параметры и характеристики ИМС. Поэтому необходима защита поверхности кристаллов от внешних воздействий.

Следует отметить, что поверхность кристаллов бескорпусных ИМС, изготавливаемых по планарной технологии, защищена окисной пленкой или пленкой нитрида кремния. Однако эти покрытия являются тонкими и могут легко повреждаться в процессе транспортировки или на стадиях сборки БГИС. Кроме того, в защите нуждаются и другие элементы ИМС, в частности электроды и межсоединения. Поэтому производят дополнительную защиту ИМС пленками из полимеров или стекол.

Материалы, применяемые для защиты поверхности кристаллов ИМС, должны иметь хорошие диэлектрические свойства, быть термостойкими и холодостойкими, обладать хорошей адгезией с металлами и поверхностью кристалла, иметь низкую влагопоглощаемость, обладать малой химической активностью, иметь коэффициенты термического расширения близкие к соответствующему коэффициенту полупроводника.

Широкое применение для защиты поверхности кристаллов от окружающей среды получили: кремнийорганические компаунды, эпоксидные компаунды, эмали лаки. Эти покрытия плотно сцепляются с поверхностью полупроводника и предотвращают доступ водяных паров, кислорода и других веществ.

Более перспективным является метод защиты ИМС тонкими пленками стекол. Стекла имеют высокую влагостойкость и обладают хорошими стабилизирующими свойствами. Для защиты бескорпусных ИМС применяют боросиликатные, свинцовоборосиликатные, халькогенидные стекла и др. Для предотвращения химического взаимодействия стекла с металлом разводки перед нанесением пленки стекла на поверхность ИМС осаждают буферный слой. Таким слоем может, например, служить пленка  $\text{SiO}_2$ , полученная методом пиролиза

## **5.5 Контрольные вопросы**

1. Перечислите основные технологические процессы сборки ИМС. Охарактеризуйте каждый из них.

2. Перечислите основные методы скрайбирования. Назовите их достоинства и недостатки.
3. Дайте определение прямого и перевернутого монтажа.
4. Перечислите основные методы присоединения кристаллов к основанию корпуса или на подложку.
5. Какие методы используются для присоединения выводов в ИМС?
6. Каким требованиям должна удовлетворять конструкция корпуса ИМС?
7. Дайте классификацию корпусов ИМС по форме и расположению выводов?
8. Какие материалы применяются для защиты поверхности кристалла бескорпусной ИМС?

## Список использованных источников

1. Степаненко, И.П. Основы микроэлектроники : учебное пособие для вузов / И. П. Степаненко. – 2-е изд. – М.: Лаб. Базовых знаний, 2003. – 488 с.: ил – ISBN 5-93208-045-0.
2. Смирнов, В. И. Физико-химические основы технологии электронных средств : учебное пособие / В. И. Смирнов. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 112 с. – ISBN 5-89146-600-0.
3. Щука, А. А. Электроника: учебное пособие / Под ред. проф. А. С. Сигова. — СПб. : БХВ - Петербург, 2005. – 800 с.: ил – ISBN 5-94157-461-4.
4. Ефимов, И. Е. Микроэлектроника : физические и технологические основы, надёжность: учебное пособие для вузов / И. Е. Ефимов, И. Я. Козырь, Ю. И. Горбунов .– 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк, 1986. – 464 с. : ил.
5. Лопухин, В. А Системы технологий компьютерного производства. Технология интегральных микросхем : учебное пособие / В. А. Лопухин, Д. К. Шелест. – СПб : ГУАП. СПб, 1999. – 106 с.; ил.
6. Аваев, Н.А Основы микроэлектроники. : учеб. пособие для вузов / Н. А. Аваев, Ю. Е. Наумов, В. Т. Фролкин . – М. : Радио и связь, 1991. - 288 с. : ил.
7. Троян, П.Е. Микроэлектроника: учебное пособие / П.Е Троян – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 346 с. – Режим доступа:  
[http://miel.tusur.ru/files/method/TroyanMicroelectronica\(theory\).pdf](http://miel.tusur.ru/files/method/TroyanMicroelectronica(theory).pdf)
8. Валетов, В.А Основы производства радиоэлектронной аппаратуры: учебное пособие /В.А Валетов – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007 - 112с. – Режим доступа:  
[http://window.edu.ru/window\\_catalog](http://window.edu.ru/window_catalog)
9. Случинская, И. А. Основы материаловедения и технологии полупроводников / И.А Случинская – Москва, 2002 – Режим доступа:  
<http://www.pmkmp.ru/mv/liter.html>