

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

А.В. АРХИПОВ, М.А. СОВЕТКИНА

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств, 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

САМАРА

Издательство Самарского университета

2022

УДК 629.78(075)+004.6(075)

ББК 39.62я7+32.973.2я7

A877

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, проф. Р. В. С к и д а н о в
канд. техн. наук, доц. П. Г. Ш о п и н,

Архипов, Алексей Владимирович

A877 Основы технологии электронной компонентной базы:
учебное пособие / *А.В. Архипов, М.А. Советкина.* – Самара:
Издательство Самарского университета, 2022. – 192 с.

ISBN 978-5-7883-1750-2

Пособие представляет собой материал курса «Основы технологии электронной компонентной базы».

Предназначено для обучающихся по направлениям подготовки 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств, 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника, а также может быть полезно при изучении основ технологии электронной компонентной базы на смежных специальностях.

Подготовлено на кафедре наноинженерии Самарского университета.

УДК 629.78(075)+004.6(075)

ББК 39.62я7+32.973.2я7

ISBN 978-5-7883-1750-2

© Самарский университет, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	8
1. Краткий анализ ЭКБ	11
1.1. Что представляет из себя современная ЭКБ.....	15
2. Основные материалы подложек ЭКБ	18
2.1. Полупроводниковые подложки для твердотельных ИМС	18
2.1.1. Метод Чохральского.....	20
2.1.2. Метод безтигельной зонной плавки.....	21
2.2. Диэлектрические подложки для гибридных и пленочных ИМС.....	23
2.2.1. Основы технологии стекла.....	26
2.2.2. Основы технологии ситаллов.....	28
2.2.3. Основы технологии керамики.....	31
3. Базовые технологические процессы полупроводнико- вой ЭКБ	34
3.1. Планарная технология.....	34
3.2. Мезатехнология.....	38
3.3. Эпитаксиальное наращивание полупроводниковых слоев.....	41
3.4. Анализ базовых технологических процессов на постоянный перечень операций.....	42
4. Технологии, определяющие возможность изготовления ЭКБ	45
4.1. Подготовка полупроводниковых слитков и резка на пластины.....	45

4.2. Шлифование и полирование пластин.....	48
4.3. Очистка подложек ИМС.....	51
4.3.1. Физическая жидкостная очистка.....	51
4.3.2. Химическая жидкостная очистка и травление.....	53
4.3.3. Физическая сухая очистка и травление.....	57
4.3.4. Химическая сухая очистка и травление.....	64
4.4. Эпитаксия.....	66
4.4.1. Жидкофазная эпитаксия.....	69
4.4.2. Газофазная эпитаксия.....	71
4.4.3. Молекулярно-лучевая или молекулярно- пучковая эпитаксия.....	73
4.4.4. Искусственная эпитаксия.....	77
4.5. Формирование маскирующих и пассивирующих диэлектрических слоев.....	79
4.6. Методы формирования топологии микросхем.....	83
4.6.1. Электронная литография.....	86
4.6.2. Рентгеновская литография.....	93
4.6.3. Ионно-лучевая литография.....	97
4.7. Методы получения полупроводниковых слоев и переходов.....	98
4.7.1. Термическое диффузионное легирование.....	98
4.7.2. Ионное легирование.....	108
5. Методы изоляции биполярных структур в ИМС.....	113
6. Типовые технологические маршруты изготовления ЭКБ	117

6.1. Примеры типовых технологических маршрутов биполярных ИМС с изоляцией обратносмещенным р-п переходом.....	118
6.1.1. Разделительная диффузия насквозь эпитаксиального п-слоя.....	118
6.1.2. Коллекторная изолирующая диффузия.....	122
6.2. Примеры типовых технологических маршрутов биполярных ИМС с полной диэлектрической изоляцией.....	124
6.2.1. Кремний в поликристаллической кремниевой подложке.....	125
6.2.2. Декаль-технология.....	127
6.3. Примеры типовых технологических маршрутов биполярных ИМС с комбинированной изоляцией.....	130
6.3.1. Процесс изопланар 1.....	130
6.3.2. Процесс изопланар 2.....	132
6.3.3. Процесс полипланар.....	135
6.4. Примеры типовых технологических маршрутов МОП (МДП) ИМС.....	138
6.4.1. Изготовление МОП ИМС по толстооксидной технологии.....	139
6.4.2. Изготовление МОП ИМС с самосовмещенными затворами.....	143
6.4.3. Диффузионно-ионная технология изготовления структур МОП с самосовмещенными затворами.....	146

6.5. Примеры типовых технологических маршрутов изготовления комплементарных МОП (МДП) ИМС.....	147
6.5.1. Изготовление КМОП ИМС на одной пластине с самосовмещенными затворами.....	148
6.5.2. Изготовление КМОП ИМС по технологии КНС.....	149
7. Методы и технологии изготовления межэлементной коммутации.....	152
7.1. Однослойная алюминиевая металлизация.....	153
7.2. Многослойная металлизация.....	154
7.3. Многоуровневая металлизация.....	155
7.4. Основы тонкопленочной технологии.....	157
7.5. Основы толстопленочной технологии.....	165
8. Технологические приемы сборки и защиты ИМС.....	172
8.1. Скрайбирование подложек ИМС.....	172
8.2. Разламывание подложек ИМС.....	175
8.3. Способы установки подложек и кристаллов ИМС в корпус.....	177
8.4. Технологические приемы сборки ИМС в корпус пайка, сварка и склеивание.....	182
8.5. Методы защиты кристаллов и подложек ИМС.....	185
Заключение.....	187
Список использованных источников.....	189

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ЭКБ – электронная компонентная база;
ТП – технологический процесс;
ТО – технологическая операция;
ИМС – интегральные микросхемы;
ГИМС – гибридные интегральные микросхемы;
БИМС – большие интегральные микросхемы;
СБИМС – сверх большие интегральные микросхемы;
МОП – металл – оксид – полупроводник;
МДП – металл – диэлектрик – полупроводник;
РЭС – радиоэлектронные средства;
ТКЛР – температурный коэффициент линейного расширения;
КНС – кремний на сапфире;
ТУ – технические условия (стандарт на изделие);
СОЖ – смазывающе-охлаждающая жидкость;
СМС – синтетическое моющее средство;
ВЧ – высокочастотный;
ЖФЭ – жидкофазная эпитаксия;
ГФЭ – газофазная эпитаксия;
МПЭ – молекулярно-пучковая эпитаксия;
МЛЭ – молекулярно-лучевая эпитаксия;
мм.рт.ст. – миллиметры ртутного столба;
УФ – ультрафиолет;
ЭЛ – электронная литография;
ЭРП – электронорезист позитивный;
ЭРН – электронорезист негативный;
РИ – рентгеновское излучение;
БСС – боросиликатное стекло;
ФСС – фосфорносиликатное стекло;
ПГФ – парогазовая фаза;
КВД – кремний в диэлектрике;
КНД – кремний на диэлектрике;
КМОП – комплементарные МОП ИМС.

ВВЕДЕНИЕ

Кратко определимся с терминологией. Технология (происходит от слов тексон – искусство, мастерство, умение и логос – наука) – термин в разговорной речи может означать следующие понятия:

- 1) технологический процесс;
- 2) комплект технологических документов;
- 3) научная дисциплина, изучающая закономерности, сопровождающие процессы обработки изделия.

Производственный процесс – совокупность действий, обеспечивающих превращение исходных материалов в готовое изделие (всех действий, связанных не только с непосредственной обработкой материалов, но и тех, которые обеспечивают таковую обработку).

Технологический процесс (ТП) – часть производственного процесса, непосредственно связанная с обработкой исходных материалов. Разновидностей технологических процессов достаточно много, рассмотрим лишь основные, позволяющие ориентироваться в дальнейшем материале.

Различают:

- Единичные ТП, применяемые для создания уникальных изделий (такие изделия, которые никогда не выпускаются серийно);
- Типовые ТП, т.е. изготовление партий и серий изделий по неизменным чертежам с применением заранее оговоренного технологического оборудования в неизменных (поддерживаемых) условиях окружающей среды и неизменными параметрами, определяемыми технологическим оборудованием;
- Операционные ТП – состоит из одной операции (например, процесс формирования р-п перехода);
- Маршрутные ТП – т.е. последовательный ряд технологических операций увязанных в единое целое с целью преобразования исходных материалов в конечный продукт – изделие;

- Непрерывные ТП – это процессы, которые не могут быть прерваны до их окончания без внесения дефекта в изготавливаемое изделие;

- Дискретные или непрерывно дискретные ТП состоят из отдельных элементов, между которыми возможна пауза.

Технологическая операция (ТО) – часть технологического процесса, представляющая собой законченную обработку объекта производства на одном рабочем месте и на одном и том же оборудовании. Различают: основные, контрольные и вспомогательные.

Технологический переход – законченная часть технологической операции, характеризуется постоянством применяемого инструмента или набора инструментов (т.е. это рабочий прием). Каждая технологическая операция, как правило, состоит из нескольких технологических переходов, отличающихся друг от друга сменой не только набора инструментов и приспособлений, но и параметров обработки, а также сменой применяемых материалов. Фактически изменение одного из элементов, таких как:

- параметры окружающей среды;
- инструмент;
- режим обработки;
- набор используемых материалов, отделяет один технологический переход от другого.

Технологический метод – это способ (путь) достижения конкретной технологической задачи. Например, создать р-п переход можно, грубо говоря, тремя технологическими методами:

- термической диффузией примеси в объем полупроводника, то есть введением ее за счет градиента концентрации на границе раздела полупроводник – среда;

- ионным легированием, то есть введением примеси под действием кинетической энергии ускоренного иона примеси в объем твердого тела;

- созданием эпитаксиального гетероперехода, который состоит из полупроводников с различным типом электропроводности.

Таким образом, мы имеем три различных технологических метода достижения «одинакового» результата.

Но назвать такой результат одинаковым нельзя, так как параметры создаваемого перехода будут существенно отличаться, условия создания и требуемое оборудование различны, а каждый из методов обладает не только достоинствами, но и недостатками, которые ограничивают область его применения.

Поэтому выбор конкретного технологического метода для использования в технологическом процессе – это нетривиальная задача, которая определяет квалификацию инженера – технолога любого производства. Именно по этой причине технология является не только наукой, но и искусством, владение которым приводит к прогрессу и в отдельной технической дисциплине, и в развитии всего человечества в целом.

1. КРАТКИЙ АНАЛИЗ ЭКБ

Электроника – наука о взаимодействии электронов с электромагнитными полями и методах создания электронных приборов и устройств для преобразования электромагнитной энергии, в основном для приёма, передачи, обработки и хранения информации. Данное взаимодействие возможно в самых различных средах в вакууме, газе, жидкости, твердом теле.

Проще всего оперировать таким взаимодействием в вакууме. Именно поэтому первые электронные приборы, на которых построены так называемые поколения электронной техники, были именно вакуумными.

Всего насчитывается 5 поколений элементной базы в электронике:

- 1) дискретная электроника вакуумных приборов;
- 2) дискретная электроника твердотельных приборов;
- 3) интегральная микроэлектроника;
- 4) функциональная электроника и микроэлектроника;
- 5) нанoeлектроника.

1 поколение (1904 – 1947 гг.) – дискретная электроника вакуумных электронных приборов. Характеризуется тем, что роль активных элементов в электронных устройствах выполняли различные электровакуумные приборы, в которых пространство, изолированное газонепроницаемой оболочкой, имеет высокую степень разрежения или заполнено специальной рабочей средой (парами или газом) и действие которых основано на использовании электрических явлений в вакууме или газе. В соответствии с характером рабочей среды электровакуумные приборы подразделяются на электронные и ионные (газоразрядные).

Электронные устройства, выполненные на лампах, имели сравнительно большие габариты и массу. Число элементов в еди-

нице объёма (плотность монтажа) электронных устройств первого поколения составляло $0,001 \div 0,003$ эл/см³. В качестве пассивных элементов применялись резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, трансформаторы, переключатели и другие дискретные радиодетали.

Низкая надёжность, сложность эксплуатации, большая потребляемая мощность, громоздкость реализации явились в последующем тормозящим фактором расширения областей применения электроники. Электровакуумные приборы в настоящее время находят ограниченное применение в промышленной электронике, а газоразрядные приборы используются преимущественно в виде элементов индикации.

II поколение (1950 – начало 60-х годов) – дискретная электроника на полупроводниковых приборах – характеризовалось применением в качестве основной элементной базы дискретных полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, тиристоров). Начало этого этапа связано с изобретением в 1947 году транзисторов.

Сборка электронных устройств второго поколения осуществлялась обычно в полуавтоматическом режиме с применением, так называемого печатного монтажа, при котором полупроводниковые приборы и пассивные элементы располагались на печатной плате – диэлектрической пластине с металлизированными отверстиями (для подсоединения полупроводниковых приборов и пассивных элементов), соединёнными между собой проводниками. Проводники выполнялись по заранее заданному печатному рисунку, соответствующему определённой электронной схеме. Плотность монтажа электронных устройств второго поколения за счёт применения малогабаритных элементов составляла $\approx 0,5$ эл/см³. Применение транзисторов позволило повысить надёжность, уменьшить потребление мощности, габариты, а также затраты на производство и эксплуатацию электронной аппаратуры.

III поколение (1960 – 1980-х гг.) – интегральная микроэлектроника на интегральных микросхемах (ИМС) – связано с появлением плёночной технологии, которая в сочетании с планарной технологией дала возможность в микрообъёмах твёрдого тела изготавливать огромное количество активных приборов. Это поколение характеризуется бурным развитием микроэлектроники. Основной элементной базы третьего поколения электронных устройств стали интегральные схемы и микросборки.

Широкое развитие находит блочная конструкция электронных устройств – набор печатных плат, на которые монтируют интегральные схемы и микросборки. Плотность монтажа электронных устройств третьего поколения составляет ≤ 50 эл/см³. Этот этап развития электронных устройств характеризуется не только резким уменьшением габаритов, массы и энергопотребления, но и резким повышением их надёжности за счёт уменьшения контактов внутри схемы и за счёт сведения к минимуму ручного труда при изготовлении электронных устройств. Данное поколение характеризуется стремлением к полной автоматизации сборки электронной аппаратуры.

IV поколение (с 1980 г. по настоящее время) – интегральная микроэлектроника с применением функциональных приборов. Характеризуется дальнейшей микроминиатюризацией электронных устройств на базе применения больших интегральных микросхем (БИМС) и сверхбольших интегральных микросхем (СБИМС), когда уже отдельные функциональные блоки выполняются в одной интегральной схеме, представляющей собой готовое электронное устройство приёма, преобразования или передачи информации. Такие электронные устройства в ряде случаев позволяют полностью обеспечить требуемый алгоритм обработки исходной информации и существенно повысить надёжность их функционирования.

Основным отличием элементов так называемой функциональной электроники является функционирование без использования канонического принципа радиосцепей, а на основе преобразования носителя информации путем взаимодействия с каким-либо физическим (химическим или каким-либо другим явлением). Плотность монтажа электронных устройств четвертого поколения составляет 1000 эл/см^3 и выше. Основным недостатком функциональной электроники является то, что она так и не смогла создать элементную базу, полностью покрывающую потребности техники. То есть, нет ни одного устройства, которое состоит только из элементов функциональной электроники. Правда, сейчас трудно найти устройство, которое не содержало бы в себе хоть один элемент функциональной электроники.

V поколение (с начала 2000-хтысячных годов) – наноэлектроника. Данное направление не является завершенным. Собственно говоря, его невозможно пока четко отделить от других поколений электронной техники. Полагаю, что для его определения, подойдет следующее:

Наноэлектроника – это электроника, использующая в качестве элементной базы электронные приборы, построенные на основе так называемых нанообъектов и наноматериалов.

В свою очередь нанообъектом можно назвать объект с размерами в одной или более координате больше волны де Бройля для электрона при его движении в полупроводнике (т.к. полупроводники основные материалы современной твердотельной электроники). Длина волны составляет примерно 100 нм, а, следовательно, любой материальный объект с размерами в одной, двух или трех пространственных координатах, менее 100 нм.

Наноматериалы – это и нанообъекты и материалы, имеющие размеры или структурированные на наноуровне. Очевидно, что плотность монтажа электронных устройств данного поколения

будет просто феноменальной. Речь идет об элементах, которые могут достичь молекулярного уровня, которые будут монтироваться не на печатную плату, как в предыдущих поколениях, а в объеме твердого тела. Главной проблемой внедрения нанoeлектронной техники является недостаточно развитая технология.

Учитывая все вышесказанное, следует отметить, что в современной электронной технике используются элементы всех пяти поколений. Нельзя сказать, что даже полное развитие нанoeлектроники приведет к отказу от элементной базы первого и второго поколений. Кроме того, помимо технологических препятствий на пути нанoeлектроники присутствуют препятствия эргономического характера. Человечество пока не готово к поголовной имплантации устройств нанoeлектронного уровня, и восприятию сигналов, поступающих прямо в мозг пользователя. Но даже если отринуть данное препятствие, то остаются различные отрасли, где быстрое действие (главная причина миниатюризации и интегрирования) не требуется, но остается актуальным удобство пользования аппаратурой. А это удобство подразумевает соответствие органов управления размерам рук человека и качество восприятия визуальной картинки размерам экрана в соотношении с его разрешающей способностью.

1.1. Что представляет из себя современная ЭКБ

Исходя из анализа, приведенного выше, мы можем сделать определенный вывод о составе современной элементной базы электроники. Как было сказано, находит применение элементная база всех пяти поколений, однако в массовой аппаратуре, мы можем смело утверждать, что господствует полупроводниковая твердотельная элементная база смешанного третьего, четвертого и второго поколений. То есть современная электроника базируется на принципах интегральной микроминиатюризации аппаратуры с

широким привлечением элементов функциональной электроники и применением дискретных элементов в том случае, когда ими выгодно дополнить схему без разработки специализированного микроэлектронного устройства или в том случае если микроминиатюризация практически невозможна. Последнее имеет место в ряде случаев, например, при необходимости широкого использования индуктивных элементов, элементов с нетипичными для данной схемы типонаминалами (резисторов с очень высокими сопротивлениями, конденсаторов с большими емкостями, активных элементов, рассчитанных на высокие мощности или сверхвысокие частоты и так далее). Но, в любом случае, технологическое изготовление всей этой элементной базы осуществляется по одним и тем же принципам, отработанным для элементной базы именно третьего поколения, то есть для микроэлектроники.

Поэтому, дальнейшее изложение имеет смысл проводить, опираясь именно на технологии изготовления ИМС, которые составляют основу технологического императива современной электроники.

Как и любая другая классификация, классификация микросхем условна и может быть проведена на основании различных признаков. По конструктивно-технологическому исполнению структур все микросхемы можно подразделить на три группы:

- 1) твердотельные (полупроводниковые);
- 2) гибридные;
- 3) прочие.

В свою очередь каждая из этих групп может быть поделена на подгруппы. Так среди полупроводниковых принято выделять:

- биполярные;
- МОП (металл-оксид-полупроводник) или иначе МДП (металл-диэлектрик-полупроводник);
- комплементарные.

Гибридные подразделяются по технологическому принципу изготовления пассивных пленочных элементов на:

- тонкопленочные;
- толстопленочные.

К прочим относят ИМС достаточно экзотических видов, которые в настоящее время практически исчезли из обращения или наоборот еще не нашли широкого применения, например:

- пленочные;
- вакуумные;
- керамические.

В настоящее время пленочная микроэлектроника практически исчезла. Эта технология имеет место в основном при изготовлении микросборок, которые являются инструментом комплексной микроминиатюризации РЭС.

Поэтому при изучении данного курса имеет смысл уделить основное внимание именно полупроводниковой элементной базе главной отличительной особенностью которой, является то, что все конструктивные элементы выполняются в едином технологическом цикле в объеме и приповерхностных областях монокристаллической подложки полупроводника.

2. ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПОДЛОЖЕК ЭБЭ

2.1. Полупроводниковые подложки для твердотельных ИМС

Спектр применяемых в электронике полупроводниковых материалов очень широк [1]. В него входят элементарные полупроводники типа германия, кремния и различные так называемые бинарные соединения типа $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$, $A^{IV}B^{IV}$ и некоторые другие химические соединения (при этом цифры обозначают подгруппы периодической системы Менделеева). Существует ряд существенных отличий в технологии получения полупроводниковых материалов, обусловленных распространенностью исходного сырья; свойствами того или иного элемента, входящего в состав соединения или определяющего свойства элементарного полупроводника. Однако при этом в технологических приемах формирования чистых полупроводниковых материалов есть много общего. Рассмотрим, для примера способы получения кремниевых слитков. Так как кремний до настоящего времени остается одним из главных полупроводников современной электроники. Кремний Si – самый распространенный элемент в земной коре – 29,5% массы земной коры (2-е место после O_2). Получение Si производится путем восстановления углеродсодержащим материалом в электрических печах природной двуокиси кремния SiO_2 (чистый белый кварцевый песок).

Это первая операция, в результате которой получают мелкокристаллический технический кремний, содержащий около 1% примеси.

Требуемая чистота для применения в электронике достигается путем следующих операций:

- 1) превращение кремния в легколетучее соединение, которое легко может быть восстановлено после очистки ($SiHCl_3$);
- 2) очистка физическим и химическим способами;

- 3) восстановление с выделением чистого кремния;
- 4) окончательная кристаллизация, очистка и выращивание монокристалла.

Наибольшее распространение получила методика с использованием трихлорсилана SiHCl_3 . Это жидкость с $T_{\text{кип}}=32^\circ\text{C}$. Следовательно, данное вещество легко подвергнуть очистке путем экстракции, адсорбции и ректификации.

Очищенный таким образом SiHCl_3 поступает на установку восстановления, которая имеет следующий вид как показано на рисунке 1.

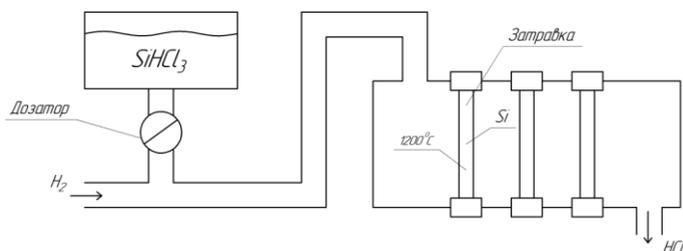


Рисунок 1 – Установка по выращиванию поликристаллических стержней чистого кремния

На нагретых до нужного состояния затравочных стержнях (1200°C) осаждается чистый поликристаллический кремний до нужного диаметра.

Следующим этапом является формирование монокристаллического слитка.

Наиболее известными и широко применяемыми методами при этом являются три:

- вытягивания из расплава или так называемый метод Чохральского;
- метод безтигельной зонной плавки;
- эпитаксиального наращивания монокристаллических слоев на подложку.

Эпитаксией мы займемся позже, выделив ее как один из наиболее перспективных современных технологических процессов в отдельную главу. А здесь более подробно остановимся на первых двух, так как именно они позволяют получать объемные монокристаллические материалы, служащие основой для изготовления полупроводниковых подложек.

2.1.1. Метод Чохральского

Применим для получения больших монокристаллов (называемых в просторечии бульбой). В настоящее время выращивают бездислокационные монокристаллы до 300–350 мм в диаметре и длиной до 1–2 м. Они отличаются малым удельным сопротивлением ($>0,5 \text{ Ом}\times\text{м}$). Схематическое изображение установки приведено на рисунке 2.

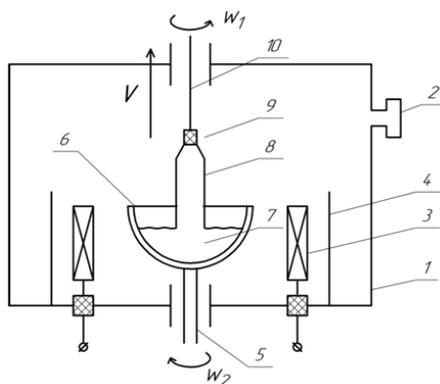


Рисунок 2 – Схематическое изображение установки по выращиванию монокристаллов методом Чохральского:

- 1 – рабочая камера; 2 – смотровое окно; 3 – ВЧ индуктор;
- 4 – тепловой экран; 5 – штот для вращения тигля; 5 – графитовый тигель с кварцевым вкладышем; 6 – расплав вещества, превращаемого

в монокристаллический материал; 7 – растущий монокристалл;

8 – затравка; 9 – шток для вращения кремневой затравки

Вытягивание производится со скоростью 20–40 мкм/с в инертном газе или вакууме. Скорости вращения затравки и тигля $W_1 = W_2 \approx 30$ об/мин.

Достоинства метода:

- высокая производительность;
- технологичность;
- хорошая освоенность;
- высокое качество монокристаллического материала.

Недостаток:

• загрязнение примесью кислорода, источником которого является кварцевый вкладыш, что и является основной причиной относительно низкого удельного сопротивления формируемого монокристалла.

2.1.2. Метод безтигельной зонной плавки

Этот метод применим для получения относительно небольших монокристаллов диаметром 30–60 мм до 100 максимально, и обладающих сопротивлением до 200 Ом×м. Его технологическая схема проста (рисунок 3).

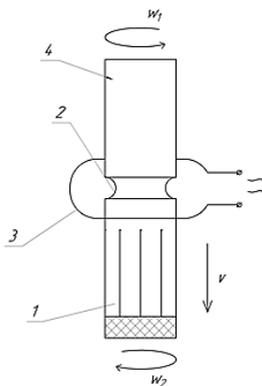


Рисунок 3 – Упрощенная схема реализации метода безтигельной зонной плавки: 1 – монокристалл; 2 – расплавленная зона; 3 – индуктор; 4 – поликристаллический стержень

Процесс происходит в вакууме или в инертном газе (рабочая камера просто опущена в рисунок). Узкая расплавленная зона держится между двумя твердыми за счет сил поверхностного натяжения. Расплавление производится ВЧ индуктором. Верхняя и нижняя части вращаются друг относительно друга со скоростью 30 об/мин в разные стороны.

Скорость вертикального перемещения ВЧ индуктора, а, следовательно, и расплавленной зоны аналогична скорости вытягивания монокристалла по методу Чохральского.

Достоинства:

- отсутствие тигля;
- возможность использования для очистки материала (более легкоплавкие примеси мигрируют вместе с расплавленной зоной и могут быть отрезаны как не соответствующие нормам).

Недостатки:

- меньший диаметр формируемого монокристалла;
- техническая сложность организации узкой зоны расплава, которая позволяла бы удерживать расплавленное вещество в локальной зоне.

В результате применения этих двух процессов получают полупроводниковой чистоты монокристаллический материал, обладающий следующими свойствами:

Основные физические свойства кремния:

- плотность 2300 кг/м^3 ;
- коэффициент теплопроводности при 20°C $80 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
- средняя удельная теплоемкость в интервале $0\text{--}100^\circ\text{C}$ $710 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$;
- температура плавления 1414°C ;

- собственное удельное сопротивление при 20°C 2000 Ом·м;
- ширина запрещенной зоны при 20°C 1,12 эВ;
- подвижность электронов при 20°C 0,14 м²/(В·с);
- подвижность дырок при 20°C 0,05 м²/(В·с);
- работа выхода электронов 4,3 эВ;
- первый ионизационный потенциал 8,14 В;
- диэлектрическая проницаемость 12,5;
- термо-ЭДС относительно платины 41,6 мкВ/К.

2.2. Диэлектрические подложки для гибридных и пленочных ИМС

Конфигурации тонко- и толстопленочных элементов одинаковы, но их конкретные геометрические размеры (при заданных электрических параметрах) могут существенно различаться в связи с использованием совершенно разных материалов и технологических методов изготовления. Пленочные элементы нет необходимости изолировать друг от друга, так как все они выполняются на диэлектрической подложке.

Подложки в гибридных интегральных микросхемах (ГИМС) играют очень важную роль. Во-первых, подложка является конструктивной основой микросхемы: на неё наносят в виде пленок пассивные элементы схемы и размещают контакты для подключения микросхемы к аппаратуре. Во-вторых, от материала подложки и его обработки существенно зависят параметры осаждаемых пленочных слоев и надежность всей микросхемы.

Материал подложки должен обладать:

- высоким удельным электрическим сопротивлением;
- быть механически прочным при небольших толщинах;
- быть химически инертным к осаждаемым веществам;

- иметь высокую физическую и химическую стойкость при нагревании до нескольких сот градусов;
- не выделять газов в вакууме;
- обладать хорошей полируемостью поверхности;
- иметь хорошую адгезию (механическое сцепление, прилипаемость) к напыляемым пленкам;
- желательно иметь хорошую теплопроводность для обеспечения теплоотвода от активных и пассивных элементов и компонентов схемы;
- иметь температурный коэффициент линейного расширения (ТКР), по возможности, близкий к ТКР напыляемых слоев;
- быть недефицитным и иметь невысокую стоимость.

Большинству из этих требований удовлетворяют стекло и керамика. В качестве материала подложек маломощных ГИМС применяются бесщелочные боросиликатные стекла С41-1, С48-3. Силикатные стекла почти идеальный материал для подложек ГИМС. Они обладают достаточной адгезией и хорошими диэлектрическими параметрами. Их ТКЛР может быть сведен, по отношению к материалам элементов ГИМС, практически к нулю. Они достаточно прочны и относятся к вакуумным материалам (не выделяют газов в вакууме поле отжига для десорбции). Они химически инертны, дешевы и недефицитны. Но адгезия металлов к ним (алюминия, как основного металла ИМС) и их теплопроводность оставляют желать лучшего.

В настоящее время для подложек ГИМС в основном применяют ситалл и фотоситалл. Они представляют собой стеклокерамический материал, получаемый путем стимулированной термообработки и введением специальных добавок для кристаллизации стекла. По своим свойствам они превосходят свойства исходного стекла в качестве теплопроводности и отвечают всем вышеперечисленным требованиям. Кроме того, в отличие от керамики, по-

лучение особо гладких поверхностей не представляет собой технически сложную задачу.

Для толстоплёночных ИМС и микросхем повышенной мощности в качестве материала подложек и плат применяют высокотемпературные керамики типа 22ХС (96 % Al_2O_3) и «Поликор». Для особо мощных микросхем применяется бериллиевая керамика (99,5 % BeO), превосходящая ряд металлов по теплопроводности, и покрытые диэлектриком металлические основания из сплавов алюминия или стальные. Параметры ряда распространённых материалов подложек и плат приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры материалов подложек и плат ГИМС [1]

Параметр	Стекло		Ситалл СТ50-1	Плавле- ный кварц	Керамика		
	C41-1	C48-3			22ХС	Поли- кор	Гла- зуро- ван- ная
Класс чистоты поверхности	14	14	13-14	14	12	12-14	14
ТКЛР, $^{\circ}C^{-1}$ (диапазон температур 20-300 $^{\circ}C$)	$(41\pm 2) \times 10^{-7}$	$(48\pm 2) \times 10^{-7}$	$(50\pm 2) \times 10^{-7}$	$(55\pm 2) \times 10^{-7}$	$(55\pm 5) \times 10^{-7}$	$(73\pm 2) \times 10^{-7}$	$(75\pm 3) \times 10^{-7}$
Теплопроводность, Вт/(м \times $^{\circ}C$)	1	1,5	1,5	7-15	10	30-45	1,2-1,7
Температура размягчения, $^{\circ}C$	--	750	620	1500	1500	--	1900
Относительная диэлектрическая проницаемость ($f = 10^6$ Гц, $T = +20^{\circ}C$)	7,5	3 - 8	5-8	3,8	10,3	10,5	13-16
Тангенс угла диэлектрических потерь ($f = 10^6$ Гц, $T = +20^{\circ}C$)	2×10^{-5}	$1,5 \times 10^{-5}$	2×10^{-5}	--	$0,6 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$
Объемное сопротивление (Ом \times см, $T=20^{\circ}C$)	10^{17}	10^{14}	--	10^{15}	--	--	--
Электрическая прочность, Кв/см	400	400	--	--	500	--	500

Высокие требования предъявляются к качеству обработки поверхности подложек в отношении шероховатости и неровности поверхности подложки. Для тонкопленочных элементов при толщине пленок чуть более 0,1 мкм допускается высота микронеровностей не более 0,025 мкм, что соответствует 14 классу чистоты поверхности. Для толстоплёночных конструкций при толщине плёнок 10...50 мкм микронеровности могут достигать 1...3 мкм, что соответствует 8...10 классам чистоты поверхности. Более того, в связи со спецификой шелкографической технологии нанесения толстых плёнок, высота микронеровностей должна быть не менее 50...200 нм.

При необходимости обеспечения особо качественного теплоотвода применяются металлические подложки: алюминиевые, покрытые слоем диэлектрического окисла Al_2O_3 , или эмалированные стальные.

Технологии изготовления диэлектрических подложек существенно отличаются от технологий изготовления полупроводниковых материалов, так как нет, как правило, необходимости использования монокристаллических материалов (исключение составляют эпитаксиальные процессы, как например, в технологии КНС – кремний на сапфире).

2.2.1. Основы технологии стекла

Стекло – твердый квазиаморфный материал, полученный при переохлаждении расплава, содержащего стеклообразующие компоненты. В качестве таких компонентов могут выступать самые различные вещества, однако в технике и, в частности, в электронике наиболее часто в качестве основы применяются так называемые стеклообразующие оксиды (оксиды Si, B, Al, P и так далее) и оксиды металлов (Li, K, Mg, Pb и так далее).

Изделия из стекла характеризуются высокими: механической прочностью, твердостью, химической стойкостью, водо- и газонепроницаемостью, отличными оптическими свойствами. Вместе с тем существенными недостатками изделий из стекла являются их повышенная хрупкость, сложность механической обработки и опасность порезов и травм персонала осколками стекла.

В качестве главных сырьевых материалов применяют: кремнезем (оксид кремния), глинозем (оксид алюминия), а также оксиды натрия, калия, кальция, магния и другие. Главные сырьевые материалы определяют потребительские свойства стекла и вводятся в стекломассу главным образом в виде природных соединений. В частности, кремнезем, являющийся основным стеклообразующим компонентом, вводится в стекломассу в виде специально подготовленного кварцевого песка.

В качестве вспомогательных сырьевых материалов в стекломассу вводятся различные вещества позволяющие регулировать его свойства и технологичность изготовления изделий. Для изделий электронной техники важно, чтобы стекло имело определенный ТКЛР и заданные электрофизические характеристики.

Для регулировки ТКЛР в стекло добавляют щелочи металлов, с ростом концентрации щелочей растет и коэффициент линейного расширения. Электрофизические характеристики также могут быть изменены за счет изменения состава, но более сложным образом. В основном стеклам присуща ионная объемная электропроводность и, как следствие, увеличение концентрации более «маленьких» и легких ионов увеличивает, например, электропроводность стекла и наоборот.

Вне зависимости от вида и назначения стеклянных изделий в технологии стекла выделяют следующие основные стадии:

- подготовка сырьевых материалов;
- приготовление стекольной шихты;

- варка стекла;
- формование (выработка стекла);
- термическая обработка.

Подготовка сырьевых материалов включает в себя предварительное дробление, сушку, тонкое измельчение.

Приготовление стекольной шихты включает в себя дозирование исходных материалов, их тщательное перемешивание для получения однородной смеси исходных компонентов – шихты, брикетирование и гранулирование шихты.

Варка стекла (стекловарение) – основная и самая сложная стадия в производстве стекла. По своей сущности это совокупность высокотемпературных химических процессов. Процесс варки стекломассы условно подразделяют на силикатообразование (ок. 400°C), стеклообразование (ок. 1000°C), гомогенизация (ок. 1400–1600°C), охлаждение (до температуры оптимальной вязкости).

Варка стекла осуществляется в специальных стекловаренных печах периодического или непрерывного действия. Охлажденная до необходимой температуры выработки стекломасса поступает на стадию *формования* изделий.

Термическая обработка является заключительной стадией в производстве изделий из стекла. В большинстве случаев стеклянные изделия подвергают отжигу – нагреву до температуры, которая на 20°C ниже температуры размягчения стекла (400–600 °C) и последующему медленному охлаждению. Отжиг снимает внутренние напряжения, возникшие в выработанном изделии из – за неравномерности охлаждения его наружных и внутренних слоев, и тем самым уменьшает вероятность разрушения изделия под действием незначительных механических нагрузок.

2.2.2. Основы технологии ситаллов

Термин «ситаллы» образован из слов: стекло и кристаллы. За рубежом их называют стеклокерамикой, пирокерамами. По структуре и технологии получения ситаллы занимают промежуточное положение между обычным стеклом и керамикой. От неорганических стекол они отличаются кристаллическим строением, а от керамических материалов – более мелкозернистой и однородной микрокристаллической структурой.

В процессе кристаллизации стекла наиболее существенно изменяются следующие его свойства:

- Растет механическая прочность, особенно заметно при испытании на изгиб. Причина состоит в том, что поверхностные трещины, наталкиваясь на кристаллиты, не могут развиваться так интенсивно, как в стекле.
- Повышается нагревостойкость и температура начала деформации, так как диапазон температур размягчение – плавление значительно сужается по сравнению со стеклами.
- Появляется дополнительное средство регулирования свойств.

Получаются ситаллы путем плавления стекольной шихты специального состава с добавкой нуклеаторов (катализаторов). В состав стекла, применяемого для получения ситаллов, входят окислы Li_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , CaO и так далее. Кроме того, добавляются катализаторы кристаллизации. К ним относятся соли светочувствительных металлов Au, Ag, Cu или фтористые и фосфатные соединения, TiO_2 и другие. Нуклеаторы добавляют при плавлении стекольной шихты, далее расплав охлаждают до пластичного состояния, а затем формируют из него изделия методами стекольной технологии, после чего производится ситаллизация (кристаллизация).

В зависимости от способа получения ситаллы делятся на фотоситаллы и термоситаллы [2].

Фотоситаллы получают из стекол литиевой системы с нуклеаторами – коллоидными красителями. В расплавленном стекле ($T_{пл} = 1250 - 1600^{\circ}\text{C}$), нуклеаторы находятся в виде ионов, выделяющихся из соответствующих окислов. Центрами кристаллизации являются мельчайшие частицы металлов. Для инициирования фотохимической реакции стекло облучают ультрафиолетовыми или рентгеновскими лучами. При термообработке происходит рост и образование кристаллитов вокруг металлических частиц. Одновременно при проявлении (низкотемпературной обработке) материал приобретает определенную окраску.

Термоситаллы получают из стекол, систем $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ и других с добавкой TiO_2 , FeS и других нуклеаторов. Стекломассу подвергают двух ступенчатой термообработке. На первой ступени обработки образуются и растут зародыши кристаллизации, создающие упрочняющий изделие каркас, при температуре равной $500-700^{\circ}\text{C}$. На второй ступени при более высокой температуре ($900-1100^{\circ}\text{C}$) происходит окончательная кристаллизация стекла. Когда процесс ситаллизации закончен, детали охлаждают до комнатной температуры.

Структура ситаллов многофазная, состоит из зерен одной или нескольких кристаллических фаз, скрепленных между собой стекловидной прослойкой. Содержание кристаллической фазы колеблется от 30 до 95%. Размер оптимально развитых кристаллитов обычно не превышает 1 – 2 мкм. По внешнему виду ситаллы могут быть непрозрачными и прозрачными (количество стеклофазы до 40%).

Свойства ситаллов определяются структурой и фазовым составом. Причина ценных свойств ситаллов заключается в их исключительной мелкозернистости, почти идеальной поликристаллической структуре. Свойства ситалла изотропны. В них совершенно отсутствует всякая пористость. Усадка при кристаллизации – до 2 %.

Большая абразивная стойкость делает их малочувствительными к поверхностным дефектам. Стеклокристаллические материалы обладают высокой химической устойчивостью к кислотам и щелочам, не окисляются даже при высоких температурах. Они газонепроницаемы и обладают нулевым водопоглощением. Ситаллы относят к хрупким материалам, по твердости они приближаются к стали.

Ситаллы марок Ст32, Ст38, Ст50 (цифра обозначает значение ТКЛР) в виде полированных пластин толщиной 0,35...1 мм размером 60×48 мм являются основным материалом подложек тонкопленочных ГИМС.

2.2.3. Основы технологии керамики

Керамика (гр. *keramike* – гончарное искусство; *keramos* – горшечная глина) [5] – большая группа материалов и изделий, полученных в результате единого технологического цикла, содержащего так называемый высокотемпературный обжиг.

Керамические изделия характеризуются хорошими эксплуатационными, механическими, химическими свойствами. Кроме того они имеют сравнительно высокие плотность и теплопроводность. Основными классификационными признаками керамических изделий являются их структура и назначение.

Основным пластичным материалом для изготовления керамических изделий является глина – осадочная горная порода, состоящая в основном из глинистых минералов (каолинит, монтмориллонит, гидрослюда и др.).

Вне зависимости от вида и назначения керамических изделий в технологии керамики выделяют следующие основные стадии:

- подготовка глиняной массы;
- формование изделий;
- сушка отформованных изделий;
- обжиг высушенных изделий;

- поверхностная обработка керамических изделий.

Подготовка глиняной массы заключается в разрушении естественной структуры глины, удалении твердых каменистых включений, измельчении и увлажнении для получения однородной массы с требуемыми формовочными свойствами. На этой стадии используются в основном механические и гидромеханические процессы.

Формование заключается в придании керамическим изделиям требуемых формы и размеров. При различных способах подготовки глиняной массы оно осуществляется преимущественно на прессах или в заранее подготовленных гипсовых формах методом литья.

Сушка – обязательная промежуточная стадия технологического процесса производства керамических изделий, по своей сущности являющаяся массообменным процессом. Если сырые изделия сразу после формования подвергнуть обжигу, то они растрескаются. При серийном и массовом производстве ускорение процесса сушки керамических изделий достигается путем использования либо камерных сушилок периодического действия, либо туннельных сушилок непрерывного действия.

По мере удаления влаги при сушке частицы материала сближаются, и происходит его усадка. Для получения высококачественных изделий процесс сушки должен осуществляться по строгому режиму согласно определенному графику в зависимости от вида керамических изделий. Продолжительность процесса сушки составляет от 24 ч до 3 суток. Изделия необходимо высушить до остаточной влажности, не превышающей 5 %, во избежание неравномерной усадки и растрескивания при обжиге.

Обжиг является наиболее ответственной стадией производства керамических изделий, так как в процессе обжига формируется их структура, определяющая наиболее важные свойства изделий: прочность, водостойкость, электрофизические характеристики

ки и так далее. В процессе обжига происходят сложные физико-химические превращения в исходном материале.

Обжиг производят преимущественно в туннельных печах непрерывного действия. Условно печь делят на три зоны – подогрева, обжига и охлаждения.

Вначале происходит досушивание керамических изделий глинами, отходящими из зоны обжига (при 100–200°C). При температуре 200–800°C выделяется летучая часть органических примесей глины и выгорающих добавок, введенных в состав исходной сырьевой смеси. В интервале температур 550–800°C происходят дегидратация (полное обезвоживание) глинистых минералов и удаление химически связанной воды. При этом разрушается кристаллическая решетка наиболее легкоплавких глинистых минералов, и глина теряет пластичность. Легкоплавкие составляющие глины расплавляются, и частицы глины в местах их контакта сближаются, происходит усадка изделий. Дальнейший подъем температуры до максимальной обуславливает существенные необратимые изменения в структуре керамики: глина необратимо переходит в камневидное состояние. После достижения максимальной температуры обжига изделия подвергают изотермической выдержке для выравнивания температуры по всей их толщине. Последующее охлаждение ведут очень медленно, постепенно снижая температуру до 500–600°C. Затем изделия обдувают холодным воздухом.

Поверхностная обработка керамических изделий предназначена главным образом для придания им определенных свойств в соответствии с их назначением. В частности для изготовления подложек ГИМС пластины тех же геометрических размеров (толщиной 0,35...1 мм размером 60×48 мм) подвергаются тщательной односторонней шлифовке и полировке с целью получения поверхностей, пригодных для нанесения тонких или толстых пленок при формировании элементов ГИМС.

3. БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭКБ

Рассмотрим базовые техпроцессы промышленного производства, характерные для настоящего времени. Для понимания сущности рассмотрим только последовательности основных операций маршрута (изображение конструкций геометрически упрощено).

Для полупроводниковой технологии базовыми (служащими основой для проектирования типовых) являются три технологических маршрута:

- планарная технология;
- мезатехнология;
- эпитаксия.

3.1. Планарная технология

Отличительной особенностью данного технологического процесса является неоднократное повторение одинаковых по сути технологических операций. Название «планарная технология» происходит от *planar* – плоский, что отражает сущность данного типа элементов.

Рассмотрим последовательность операций при изготовлении планарного диода (см. рисунок 4). Как видите, на всем протяжении процесса используются только следующие операции: создание маскирующего слоя, литография и введение примеси.

Все начинается с полупроводниковой подложки (предположим *n* – типа). После подготовительных операций данную подложку следует окислить с целью создания материала контактной маски. Затем в сформированном окисном слое необходимо изготовить окно для проведения первой диффузии примеси. Для этого проводится литография по слою окисла. После формирования окна производится диффузия акцепторной примеси (например, спосо-

бом термической диффузии) и создается «карман» (локальная область) полупроводника p – типа в монокристаллической подложке полупроводника n – типа. При термической диффузии примесь распространяется не только вглубь полупроводника, но и, частично, под контактную маску, что приводит к несоответствию размеров окна маски и формируемого p - n перехода. Далее материал контактной маски, загрязненный в результате проведенной диффузии, удаляется.

Удаление может быть осуществлено различными способами, главным из которых является химическое травление с последующей промывкой и сушкой. Затем производится новое окисление с целью формирования очередной контактной маски. Затем литография и диффузия, но уже донорной примеси. Таким образом, формируется карман n -типа. После удаления контактной маски производится снова формирование диэлектрического слоя (возможно тоже окислением), но с другой целью. Данный слой служит уже не материалом контактной маски, а изолирующим диэлектрическим слоем для последующего формирования на нем межэлементной коммутации проводящим слоем металла. Поэтому требования к данному диэлектрическому слою несколько иные, чем к материалу контактной маски. Затем методом осаждения в вакууме формируется проводящий слой и производится литография по слою металла, то есть создается межэлементная коммутация или просто металлические контакты к дискретному полупроводниковому диоду.

Исходя из вышесказанного, мы можем утверждать, что суть планарной технологии сводится к последовательному чередованию всего трех операций:

- 1) окисление;
- 2) литография;
- 3) диффузия примеси.

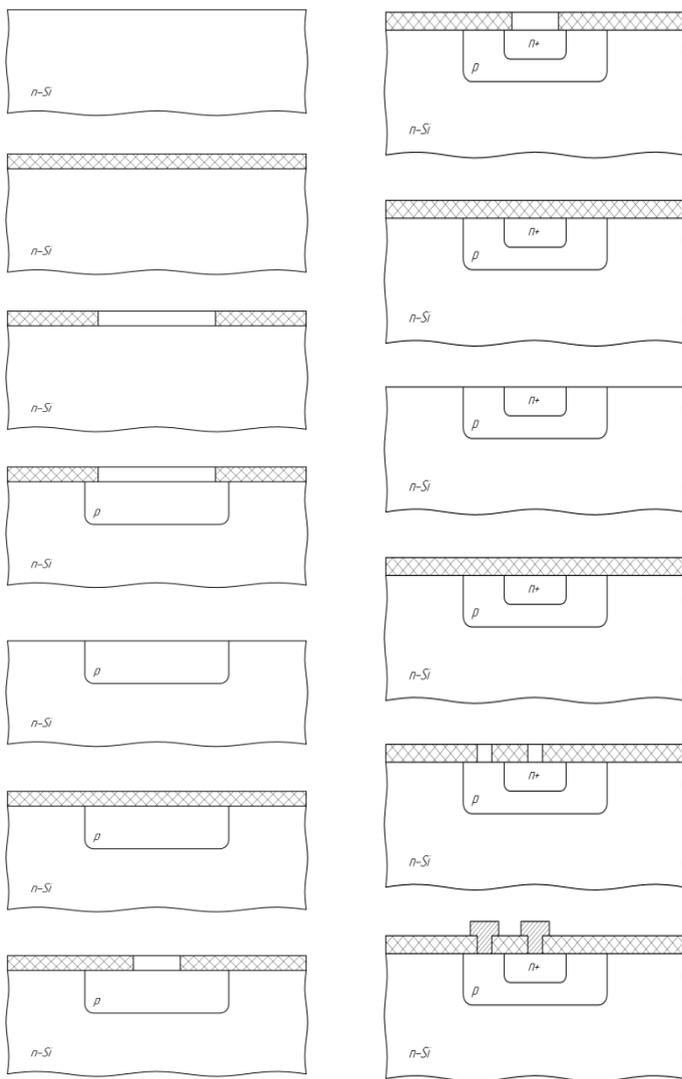


Рисунок 4 – Последовательность технологических операций планарной технологии при изготовлении планарного диода

Причем первые две в сумме представляют собой формирование контактной маски. Если бы мы провели не две последовательности формирования маски – диффузия, а три, то получили бы транзистор, если четыре – тиристор. Однако суть от этого не изменяется. Все элементы микросхем формируются одновременно в едином технологическом цикле с чередованием этих трех основных операций.

Планарная технология – массовый процесс, позволяющий практически полностью удовлетворить запросы электроники по изготовлению практически любой ЭКБ.

Здесь не указаны только обязательные операции очистки пластин до и во время цикла формирования, а также операции по формированию конечного защитного слоя и контактных площадок для коммутации в корпусе и корпусирование.

Достоинства очевидны. Но, как и любой технологический процесс, планарная технология имеет ряд недостатков:

- В своем базовом варианте планарная технология предусматривает единственный вид взаимной изоляции элементов в проводящем кристалле полупроводниковой подложки – изоляция обратномещенным р-п переходом.

- Для обеспечения качества такой изоляции необходимо, чтобы полупроводниковый монокристалл был как можно чище (с малым содержанием примесей) то есть высокоомный.

- Одновременно с этим, (если у нас имеются мощные элементы) возникает проблема теплоотвода от активных элементов ИМС. Наиболее нагруженный р-п переход транзистора (коллекторный) оказывается внутри кристалла и естественным путем отвода тепла следует считать именно объем полупроводника. Но для этого он должен иметь как можно более низкое сопротивление (удельная электропроводность прямо пропорциональна удельной теплопроводности), то есть быть сильно легированным.

- Как мы видим на рисунке, заглубленные р-п переходы имеют достаточно большую площадь, уменьшить которую достаточно проблематично даже сильно повысив разрешающую способность технологических процессов формирующих окно маски, а это говорит о том, что такой р-п переход имеет большую емкость, что снижает быстродействие активного элемента.

- Рассматривая форму р-п перехода, мы можем также отметить, что он имеет почти прямоугольную форму. Если построить распределение токов по площади р-п перехода, то мы увидим, что плотность тока у него получится неравномерной. Она будет максимальной в «углах» данного р-п перехода. А это говорит, что при повышении напряжения приложенного к нему мы имеем точки ненадежности, что приводит к высокой вероятности отказа.

Если резюмировать недостатки планарной технологии, то мы можем утверждать, что она накладывает существенные ограничения на изготовление мощных биполярных высокочастотных интегральных ИМС, с высокой надежностью эксплуатации и хорошими параметрами активных элементов. То есть в своем «чистом» виде в настоящее время она практически не применима. Именно для решения этих проблем были привлечены элементы двух следующих базовых ТП.

3.2. Мезатехнология

Исторически данная технология возникла раньше планарной до появления литографии. Впервые она была применена для формирования дискретной элементной базы. Стимулом к ее появлению послужила необходимость формирования р-п – переходов с малой площадью (увеличение частоты).

В настоящее время мезатехнология использует литографию и служит для изготовления дискретных активных элементов, в том числе для ГИМС. Она часто сочетается с планарной и эпитаксиальной технологиями.

«Meza» по-испански – стол, столовая гора. В полупроводниковой технологии мезы – это выступающие над поверхностью пластины и разделенные с боковых сторон воздушными промежутками столбики материала из исходной пластины. Их получают локальным вытравливанием углублений с помощью контактной маски.

Рассмотрим основные этапы мезотехнологии на примере изготовления структуры дискретного мезадиода.

Подготовленную чистую пластину (например n типа) легируют примесью для получения p - n – перехода, затем k r и n областям создают омические контакты (металлизация). С помощью литографии формируют контактную маску со стороны легированной области пластины. А металлизацию с противоположной стороны защищают сплошным слоем (например, лаковым). После этого проводят глубокое локальное травление до выделения p - n переходов нужной площади, то есть для образования мезаобластей. Затем маску и предохранительный лак удаляют и наносят защитный диэлектрический слой, через окна в котором осуществляется электрический контакт к областям n и p . По линии травления в дальнейшем производится разламывание подложки на отдельные полупроводниковые диоды.

Как видим, при мезотехнологии диффузия проводится не локально, как в планарной технологии, а по всей площади поверхности пластины, что подразумевает формирование плоского p - n перехода. А возможности современных литографических процессов обеспечивают высокую разрешающую способность, что позволяет сделать формируемый p - n переход очень узким и очень маленьким по площади.

В планарной технологии все p - n переходы скрыты в объеме кристалла, а в мезотехнологии выходят на поверхность мезы и, следовательно, оказываются незащищенными от внешних воздей-

ствий. Этим объясняется стабильность параметров планарных структур и необходимость нанесения диэлектрической защиты мезаструктур.

Основная трудность мезотехнологии – создание особо стойкой маскирующей пленки для глубокого локального травления.

Таким образом, применение элементов мезотехнологии в современном микроэлектронном производстве обеспечивает возможность повышения рабочей частоты, надежности и рабочего напряжения планарных структур (рисунок 5).

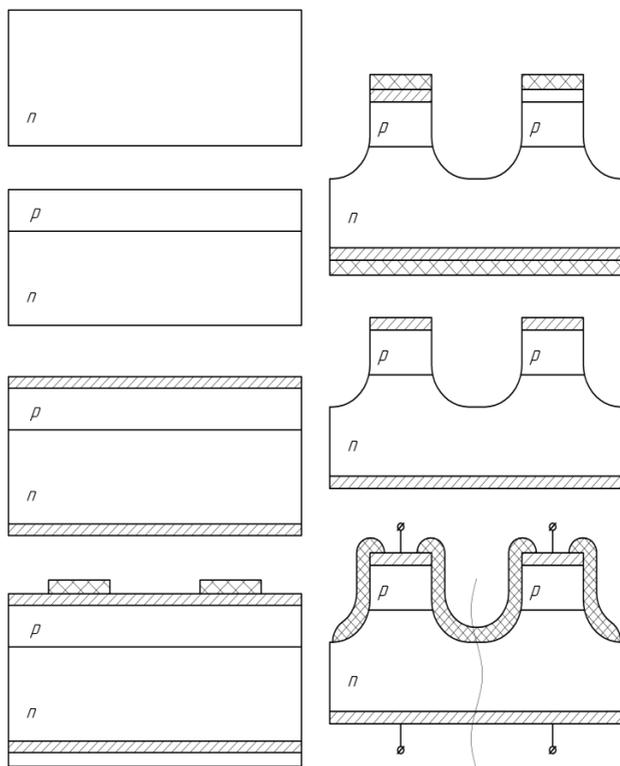


Рисунок 5 – Последовательность технологических операций мезотехнологии при изготовлении высокочастотного диода

Основными недостатками мезатехнологии являются: сравнительно большая площадь, занимаемая воздушными промежутками; нарушение плоскостности рабочей поверхности и, следовательно, невозможность использования ее для изготовления ИМС на основе только мезатехнологии.

3.3. Эпитаксиальное наращивание полупроводниковых слоев

Об эпитаксии, как технологическом процессе, мы поговорим несколько позже в другом разделе. Достаточно сказать, что она позволяет наращивать полупроводниковые слои достаточно высокого качества на полупроводниковые или диэлектрические подложки с так называемым управляемым легированием растущего слоя, что позволяет создавать такие «сэндвич структуры» из монокристаллического полупроводника. Определим теперь место в данного процесса технологии формирования активных элементов.

Эпитаксия существенно улучшает параметры полупроводниковых приборов и микросхем, их воспроизводимость, увеличивает процент выхода годных изделий и уменьшает себестоимость.

Обычно активные области полупроводниковых приборов и элементы микросхем формируются около рабочей поверхности, остальная часть пластины выполняет лишь конструктивную роль (механическая прочность, манипуляции со сверхтонкими кристаллами невозможны).

Эпитаксия – это путь уменьшения паразитного сопротивления конструктивной части полупроводниковой пластины для улучшения ее теплопроводности.

Для нормальной работы ИМС, как правило, требуется, чтобы часть толщины полупроводниковой пластины, в которой располагаются элементы, была низкоомной (что обеспечивает хороший теплоотвод), а зона формирования элементов – высокоомной (что

позволяет повысить качество изоляции структур). Это и достигается эпитаксией сравнительно тонкого рабочего слоя полупроводника на сильнолегированной монокристаллической подложке.

Достоинством эпитаксии также является большая возможность, чем при легировании, получения требуемых равномерных распределений примеси по толщине выращенного эпитаксиального слоя.

Таким образом, решается фундаментальная задача теплоотвода от активных элементов ИМС и нивелируется еще один недостаток, характерный для планарной технологии.

Эти три базовых технологии составляют основу полупроводниковой техники в чистом виде, и в комбинациях. Что касается современной микроэлектронной технологии, то можно с уверенностью сказать, что она представляет собой комбинацию всех трех процессов меза-эпитаксиально-планарную технологию.

3.4. Анализ базовых технологических процессов на постоянный перечень операций

Рассматривая изложенный выше материал, мы можем определить перечень технологических операций, которые необходимы для изготовления практически любой ЭКБ в современном производственном процессе. Начнем с изготовления подложек, которое (при условии, что материал уже имеется в наличии) потребует следующих операций:

- подготовка резка слитков на пластины;
- шлифовка пластин;
- полировка пластин;
- очистка пластин от поверхностных загрязнений;
- контроль качества изготовленных подложек.

Для формирования структуры в приповерхностном объеме полупроводниковых пластин – подложек, нам потребуются следующие технологические операции:

- изготовление материала контактной маски (например, окисление);
- литография как способ переноса рисунка с шаблона на материал контактной маски;
- травление поверхностных слоев, в том числе материала контактной маски, с целью формирования заданного микрорельефа;
- введение примеси в объем полупроводниковой пластины;
- изготовление изолирующих диэлектрических слоев (отличаются от материалов контактной маски электрофизическими свойствами);
- осаждение слоя металлического проводникового материала для изготовления межэлементной коммутации;
- литография по слою металла;
- отмывка;
- сушка;
- контроль качества сформированных структур.

Изготовление элементов ИМС с диэлектрической подложкой может быть реализовано по одному из двух технологических методов: тонко- и толсто пленочной технологии. Для реализации тонкопленочной технологии нам потребуются следующие технологические операции:

- вакуумное осаждение материалов (резистивных, проводящих, диэлектрических) на поверхность диэлектрических подложек;
- литография по слоям осажденных материалов (в том случае если не реализуется масочный способ формирования рисунка при осаждении);
- отмывка;
- сушка;
- контроль качества сформированных структур.
- Для реализации толсто пленочной технологии нам потребуются следующие технологические операции:

- трафаретная печать материалов (резистивных, проводящих, диэлектрических) на поверхность диэлектрических подложек;
- термообработка нанесенных материалов (сушка вжигание);
- отмывка;
- сушка;
- контроль качества сформированных структур.

Для окончательной сборки, как полупроводниковых ИМС, так и ИМС с диэлектрическими подложками (включая корпусирование и бескорпусную защиту) нам потребуются следующие технологические операции:

- скрайбирование полупроводниковых и диэлектрических подложек;
- разламывание подложек;
- пайка;
- сварка;
- склеивание;
- термоотверждение клеящих материалов;
- отмывка;
- сушка;
- контроль качества ИМС.

Рассмотрим следующей главе более подробно каждую из представленных в данном анализе технологических операций, не придерживаясь в дальнейшем определенной последовательности, чтобы избежать повторений.

4. ТЕХНОЛОГИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭКБ

4.1. Подготовка полупроводниковых слитков и резка на пластины [3]

После выращивания монокристаллического слитка полупроводника от него отрезают затравочную и хвостовую части, электрофизические параметры которых не соответствуют техническим условиям (ТУ). Диаметр слитков, как правило, превышает стандартный диаметр пластин (40, 60, 76, 100, 150, 200, 250, 300 мм). Поэтому их подвергают калибровке на круглошлифовальном станке. В результате получают идеально цилиндрическую болванку, с которой химическим травлением удаляют механически нарушенный слой и загрязнения. Затем, после контроля разориентации кристаллографических осей, производится резка слитка на пластины.

Существует довольно много способов реализовать резку полупроводникового монокристалла:

- стальными полотнами (с применением свободного абразива);
- стальной проволокой (с применением свободного абразива);
- отрезными дисками (способ так называемого связанного абразива).

Однако главным критерием реализации качественной и без больших потерь резки следует считать организацию правильного угла атаки на материал. Дело в том, что полупроводники кристаллизуются, как правило, в алмазоподобную кубическую решетку, что обуславливает их высокую твердость и хрупкость. Поэтому резка с применением различных абразивных материалов напоминает процесс микровыкрашивания алмазными зёрнами кристаллитов из линии реза. Предположим, что мы производим резку цилиндрического слитка (малый кружок на рисунке 6) большим отрезным абразивным диском (большой кружок).

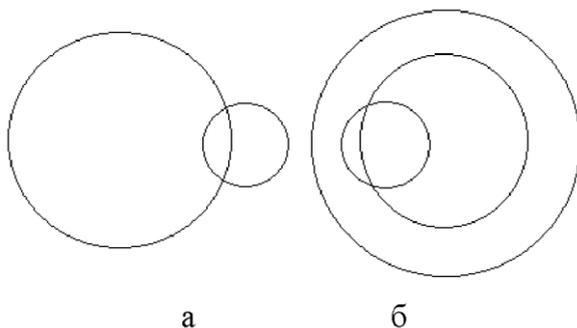


Рисунок 6 – Иллюстрация неправильного (а) и правильного (б) угла атаки абразивного круга на полупроводниковый цилиндрический слиток

На рисунке 6а резка производится абразивным диском с внешней режущей кромкой. При этом образуются острые углы на краях реза, которые могут привести к обламыванию значительного фрагмента материала. Это однозначно вызовет брак отрезаемой пластины. А на рисунке 6б резка производится диском с внутренней режущей кромкой. При этом углы формируемой линии реза тупые (такие же образуются при использовании способов со свободным абразивом). Их обламывания не происходит.

Основным методом, используемым в промышленности, является резка диском с внутренней режущей кромкой. Схему данного процесса можно изобразить следующим образом (рисунок 7).

Скорость вращения диска, как правило, не превышает 5000 об/мин. Дальнейшее ее увеличение приводит к возрастанию вибрации и температуры в зоне резки, что крайне нежелательно (станки типа "Алмаз-6М", "Алмаз-11" и "Алмаз-12М").

Рекомендуемые режимы резки: 4000–5000 об/мин, скорость продольной подачи 30...60 мм/мин, поперечная подача равна толщине отрезаемой пластины плюс ширина реза, расход СОЖ 3 л/мин.

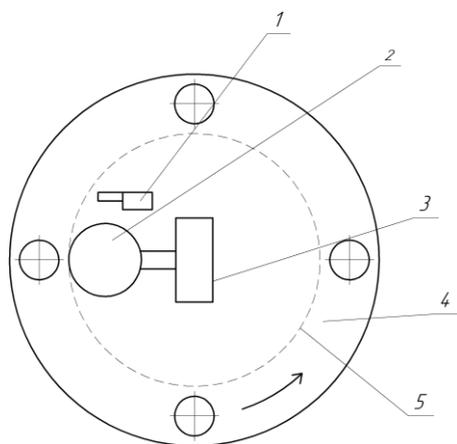


Рисунок 7 – Схема резки слитка диском с внутренней режущей кромкой:

1 – сопло для подачи СОЖ, (смазывающе-охлаждающей жидкости), в качестве которой используется часто жидкость НИИАЛМАЗ (0,6% тринатрий фосфата, 0,3% буры, 0,25% кальцинированной соды, 0,1 % нитрата натрия, остальное вода); 2 – слиток; 3 – оправка для установки и перемещения слитка; 4 – диск с внутренней режущей кромкой; 5 – резак алмазсодержащего диска

Преимущества резки диском с внутренней режущей кромкой:

- высокая скорость резания;
- хорошее качество получаемых поверхностей (8 класс шероховатости);
- малый разброс по толщине (± 20 мкм);
- небольшие отходы материала.

Недостатки:

- сложность установки режущего диска;
- зависимость качества и точности обработки от точности и качества инструмента.

4.2. Шлифование и полирование пластин

Эти операции так же как и резка производится двумя возможными путями:

1. С помощью абразивной суспензии (обработка свободным абразивом).
2. С помощью алмазных шлифовальных кругов (обработка связанным абразивом).

Наиболее часто применяется двухсторонняя шлифовка свободным абразивом.

Достоинства:

- более высокая производительность;
- высокая точность обработки пластин;
- не требует наклейки пластин;
- остаточные механические напряжения распространяются более равномерно (меньший изгиб пластин).

Для реализации данного метода применяют установку для шлифования схематично отображенную на рисунке 8.

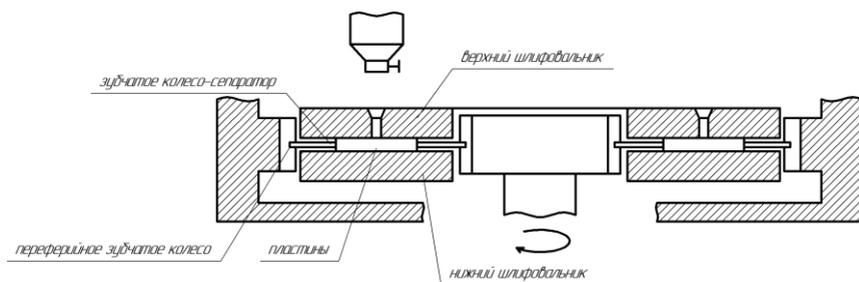


Рисунок 8 – Схема двухстороннего шлифования полупроводниковых пластин

Пластина помещается в зубчатое колесо – сепаратор, которое тоньше самой пластины и зажимается между верхним и нижним

шлифовальниками. На верхний шлифовальник с отверстиями поступает из дозатора абразивная суспензия, которая самотеком распространяется по всем поверхностям. Центральная шестерня вращаясь проворачивает сепараторы, находящиеся в зацеплении с внешней неподвижной шестерней, что приводит не только к вращению сепараторов, но и к перемещению их по кругу относительно центра. Схематично данное движение отображено на рисунке 9.

Такие шлифовальные станки, например СДШ-150 (цифра обозначает диаметр пластин) перед шлифованием моют и смазывают глицерином. Для двухстороннего шлифования используют водные или глицериновые суспензии микропорошков карбида кремния или электрокорунда белого с зернистостью от М14 до М5. Соотношение твердой и жидкой компонент Т:Ж=1:3.

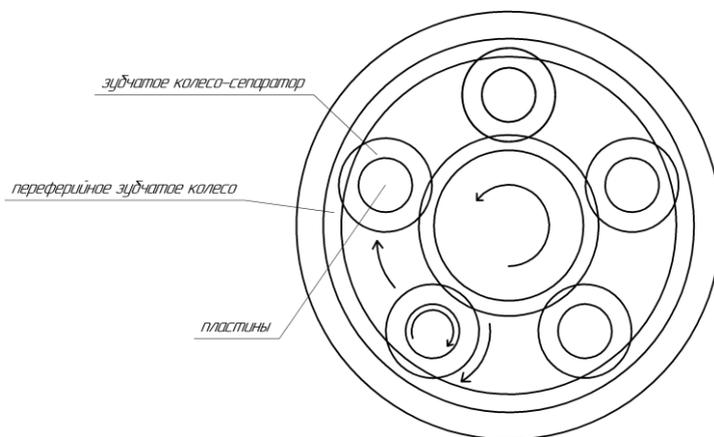


Рисунок 9 – Схема перемещения пластин в шлифовальной установке при шлифовке свободным абразивом

Шлифование производится в несколько этапов с постепенным уменьшением размера абразивного зерна. М14 до 6–7 класса шероховатости, М5 – до 10 класса. После снятия загрязнений производится контроль поверхности.

Полировка производится на мягких доводочных полировальниках. Для этого применяют тканые и нетканые материалы (сатин, батист, сукно, фетр, велюр, замшу, синтетическую кожу и др.) закрепляют на шлифовальном круге. Полирование также выполняют в несколько этапов, постепенно уменьшая размер зерна и твердость абразива. На последнем этапе воздействие абразива полностью исключается.

Абразивное полирование производится алмазными суспензиями и пастами на основе спирта, приборного масла и т.д. с размером зерен порошка 3 – 1 мкм.

Тонкое механическое полирование выполняется мягкими полировальными составами на основе оксидов алюминия, кремния, циркония и других с размером зерен менее 3 мкм.

Химико-механическое полирование отличается тем, что абразивные суспензии приготавливаются на основе щелочи, которая реагирует с кремнием. При этом достигается толщина механически нарушенного слоя менее 1 мкм.

Еще лучшее качество достигается химико-динамическими методами полирования при применении полирующих составов типа гидроалюмосиликагелей, силикагелей, алюмосиликазолей и силиказолей. При этом доля химического воздействия возрастает, а механическое воздействие значительно снижается. Слой химического соединения удаляется движущимся полировальником без абразивного воздействия. Важно соотношение твердой и жидкой суспензий и значение рН. При полировании постепенно уменьшается доля твердых фаз и уровень рН (чем он выше, тем больше химическое воздействие).

4.3. Очистка подложек ИМС

Итак, мы получили пластины кремния необходимых геометрических размеров с заданной механической обработкой поверхности. Однако прежде чем приступить к формированию топологии, необходимо произвести очистку поверхности. Различают жидкостную и сухую очистки, а также физическую и химическую.

4.3.1. Физическая жидкостная очистка

При физической очистке происходит десорбция поверхностных загрязнений без изменения их состава (то есть без химических реакций путем простого растворения).

Физическая очистка (отмывка) производится с применением различных растворителей: воды, толуола, дихлорэтана, спиртов (этилового, метилового, изопропилового и других). Технически все виды данных операций можно подразделить на очистку простым погружением, ультразвуковую и гидромеханическую.

Очистку простым погружением выполняют в жидкости или в парах жидкости с постоянной сменой омывающего растворителя, либо в проточных, и в многокаскадных ваннах. Это делается для снижения адсорбции загрязнений из растворителя.

Достоинства:

- относительная техническая простота;
- минимальные механические повреждения подложки;
- низкая себестоимость.

Недостатки:

- при применении подогретых растворителей повышается их летучесть, следовательно, предъявляются жесткие требования по технике безопасности (пожароопасность, токсичность);
- низкое (относительно) качество отмывки;
- высокий расход растворителя.

Ультразвуковая отмывка производится в емкостях, колеблющихся со звуковой частотой (≈ 40 кГц), что увеличивает динамические свойства растворителя и значительно повышает степень очистки при снижении расхода растворителя. Это происходит за счет кавитации жидкости. С ростом частоты и мощности колебаний увеличивается проникающая способность жидкости. Часто ультразвуковые очистки ведут также в подогретых средах. Ультразвуковая отмывка – один из самых совершенных методов физической очистки.

Достоинства:

- высокое качество;
- относительная техническая простота;
- гораздо меньший расход реактивов.

Недостатки:

- главным недостатком можно назвать ограниченность применения к структурированным подложкам, то есть, к тем подложкам, на которых сформированы элементы и поставлены навесные компоненты, так как возможно разрушение ультразвуком.

Под гидромеханической отмывкой понимают сочетание растворяющего воздействия жидкостей и механического воздействия различных приспособлений типа беличьих кистей, капроновых и нейлоновых щеток. При этом подложка крепится вакуумным присосом к предметному столу и при подаче растворителя через полую кисть очищается ее вращением.

Достоинства:

- возможность массового применения безотносительно к структуре, сформированной в объеме и на поверхности подложки;
- относительная техническая простота;
- меньший расход растворителя по сравнению с очисткой простым погружением.

Недостатки:

- возможность повторного загрязнения со щеток и продуктами износа щеток;
- усложнение оборудования относительно очистки простым погружением;
- необходимость очистки самих щеток (особенно при их износе).

Именно гидромеханическая отмывка приобрела наибольшее распространение среди других способов, ограниченных либо по своему качеству, либо по применимости.

4.3.2. Химическая жидкостная очистка и травление

Подразумевается разрушение загрязнений или поверхностного слоя очищаемого объекта в результате химических реакций. В качестве загрязнений на подложках после механической обработки остаются в основном различные жиры минеральные, животные и растительные, а также отдельные частицы и ионы веществ, в том числе металлов.

Поэтому процесс химической очистки часто называют обезжириванием. Химическое обезжиривание выполняют в составах, разрушающих молекулы жира, но не действующих на сам материал.

Обезжиривание производится в растворах синтетических моющих средств (СМС) типа стиральных порошков. Типичным примером является СМС типа "Лотос", который изначально был придуман именно для обезжиривания подложек и только потом стал использоваться в качестве стирального порошка. При его применении происходит так называемое омыление молекул жира в щелочных растворах (при этом неомыляемые жиры эмульгируются, то есть переводятся в связанное эмульсионное состояние). Кроме СМС, для обезжиривания используется пероксидно-аммиачный раствор ($H_2O_2 : NH_4OH : H_2O$ в пропорции 1:1:4) при этом удаляют-

ся не только жиры (как омыляемые, так и неомыляемые), но и ионы некоторых металлов типа натрия, серебра, меди и других).

По сравнению с физическими методами очистки химические обладают рядом преимуществ:

- более высокая чистота;
- меньшая опасность для персонала и экологии;
- меньший расход реактивов;
- меньшая трудоемкость.

В частности, более высокая чистота обусловлена тем, что смываемые загрязнения переводятся в связанное состояние и из раствора не попадают на подложку, а меньшая опасность для персонала и экологии обеспечивается тем, что не применяются вещества, являющиеся отравляющими для людей и окружающей среды. Как правило, эти вещества можно спокойно слить в канализацию без дополнительных способов нейтрализации в отличие от таких растворителей как дихлорэтан и толуол.

Травление

Разновидностью химического метода жидкостной очистки является травление. Поэтому мы рассмотрим его в данном разделе, но следует помнить, что травление как химическое, так и физическое – это не только способ очистки подложек, но и в первую очередь способ формирования микрорельефа в технологии микроэлектроники. Собственно сама микроэлектроника стала возможной только благодаря разработке способов передачи рисунка с шаблона на поверхность и в приповерхностный объем подложки ИМС. Обычно оно производится в кислотных или щелочных травителях. Для удаления с очищаемых поверхностей атомов и ионов металлов, а также различных оксидов, нитридов, сульфидов и других химических соединений. При кислотном травлении применяются водные растворы серной кислоты, которые носят название "каро", и раствор фтористоводородной кислоты в ацетоне (ацетон

необходим для уменьшения осадка кремний фтористоводородной кислоты). Обычно в кислотные травители добавляют так называемые комплексообразователи, то есть вещества, образующие с продуктами химической реакции различные соединения. Они позволяют предотвратить их дальнейшее осаждение на подложку. Примером такого вещества является Трилон Б (ацетонитрилнатриевая соль этилендиамина тетрауксусной кислоты). Одним из лучших травителей считается азотная кислота, так как она при нагревании легко разлагается, не образуя вредных соединений. Обычно ее применяют в комплексе с пероксидом водорода (H_2O_2 : HNO_3 : H_2O). Содержание воды в смеси зависит от степени загрязнения пластин, чем сильнее загрязнение, тем меньше воды.

Кислотное травление кремния обеспечивает получение зеркально чистой поверхности пластин любой кристаллографической ориентации с шероховатостью от 12 до 14 класса. Кислотное травление носит ярко выраженный электрохимический характер (окислительно-восстановительный процесс) и поэтому носит анизотропный характер. То есть травление происходит с одинаковой скоростью по всем кристаллографическим направлениям кристаллической структуры полупроводника. Поэтому при локальном травлении формируется практически прямоугольный карман в материале с подтравливанием под маску (рисунок 10).

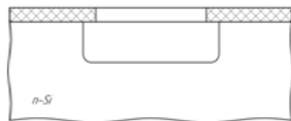


Рисунок 10 – Результат локального кислотного травления кремния

Еще одним способом травления является щелочное травление, которое протекает по чисто химическому механизму. Для травле-

ния используют водные растворы гидроксидов калия КОН и натрия NaOH. Скорость реакции возрастает с увеличением температуры и концентрации травителя (максимальная скорость достигается при 30% концентрации травителя). Травление производится при 90–100°C и при 10–30% концентрации при постоянном перемешивании.

Щелочное травление носит анизотропный характер, поэтому применяется только при специальных задачах, например, для травления пластин большого диаметра, так как при химическом травлении трудно добиться сохранения геометрических параметров пластины, например, плоскопараллельности сторон. При локальном травлении формируется, как правило, углубление не прямоугольной формы. Например, щелочное травление используют при необходимости формирования V-образных канавок в монокристаллическом кремнии за счет преимущественного травления кремния вдоль кристаллографических направлений $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$. В результате получается профиль, показанный на рисунке 11.

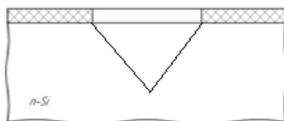


Рисунок 11 – Результат локального щелочного травления кремния

Поскольку химическая реакция на поверхности подложки происходит вплоть до полного удаления реагента, то для ее прекращения необходимо применять так называемый вытеснительный метод (травитель сливается не до конца, дабы пластины не соприкасались с воздухом). Потом в раствор добавляется деионизованная вода, которая делает травитель все менее концентрированным и постепенно полностью вытесняет кислотный или щелочной травитель.

Таким образом, завершение реакции совмещается с промывкой. А дальше производится сушка под лампами ИК или УФ излучения, а также в конвейерных печах в потоке подогретого сухого инертного газа, но чаще всего в высокоскоростных центрифугах (30000 об/мин), так как высыхание любой капли воды приводит к образованию на поверхности слоя, электрофизические параметры которого отличаются от тех где воды изначально не было. Поэтому ее предпочитают просто стряхнуть с чистой поверхности за счет центробежной силы.

4.3.3. Физическая сухая очистка и травление

Методы сухой очистки кроме отжига начали применяться сравнительно недавно. Это обусловлено тем, что чаще всего сухое травление применяется как способ создания прецизионного, локального рисунка при формировании топологии ИМС, то есть для осуществления травления через контактные маски. Таким образом, хотя мы и рассматриваем этот материал в главе, посвященной очистке подложек, следует иметь в виду, что применение этих процессов значительно более широкое [4].

Термообработка (отжиг). Термообработка применяется для удаления адсорбированных поверхностью примесей, разложения поверхностных загрязнений и испарения летучих соединений.

Он проводится в вакуумных термических установках непосредственно перед процессами оксидирования, эпитаксии, осаждения тонких пленок и других. В вакууме при $T=400^{\circ}\text{C}$ с поверхности удаляются влага, углекислый газ и легкие углеводороды. При 900°C и выше удаляются оксидные пленки. Перед эпитаксиальным наращиванием оксидные пленки удаляются отжигом в атмосфере водорода при температуре $1200...1250^{\circ}\text{C}$.

Это что касается полупроводниковых подложек. Для диэлектрических также применяется отжиг в вакууме для удаления оста-

точных загрязнений. Общий принцип можно сформулировать следующим образом – чем выше температура, тем эффективнее процесс. Однако предельное повышение температуры ограничивается температурой плавления или разложения материалов подложки.

Еще одно следствие отжига – это уменьшение толщины механически нарушенного слоя. За счет ускорения процессов диффузии происходит закрытие микротрещин.

Ионное травление – это процесс удаления слоя вещества с находящимися на его поверхности загрязнениями и адсорбированными газами путем распыления.

Оно выполняется в вакуумных установках, путем бомбардировки пластин или подложек (называемых, мишенями) ускоренными положительными ионами инертных газов. Чаще всего для этой цели применяется аргон, так как он недорог, недефицитен и обеспечивает эффективное распыление. Ускоренные ионы передают кинетическую энергию поверхностным атомам либо непосредственно, либо через цепочку соударений приповерхностных атомов мишени. В последнем случае атомы смещаются из узлов вдоль траектории движения иона, образуя зоны радиационных нарушений структуры. Травление кремния выполняется при плотностях ионного тока свыше 10 А/м^2 и энергии ионов 1–10 кэВ.

Если энергии ионов значительно превышают указанные, то они внедряются в объем кристалла и распыления не происходит.

Коэффициент распыления S зависит от массы атомов обрабатываемого материала m_1 , массы ионов m_2 , энергии ионов E и угла падения ионов, а также от физического состояния поверхности.

$$S = \frac{km_1m_2E}{\lambda(m_1 + m_2)},$$

где k – коэффициент, характеризующий состояние поверхности, λ – средняя длина свободного пробега иона в обрабатываемом ма-

териале, зависящая от угла падения иона на подложку. При падении иона перпендикулярно на поверхность подложки, он передает свою энергию только малому числу атомов мишени. Чем больше угол падения отличается от 90° , тем длиннее путь иона в приповерхностном слое, следовательно, тем эффективнее происходит распыление.

В зависимости от устройства установки различают ионно-плазменное травление и ионно-лучевое травление.

Ионно-плазменное травление

Производится в диодных или триодных камерах. Например, в диодных камерах травление производится при постоянном токе или при переменном ВЧ токе как показано на рисунке 12.

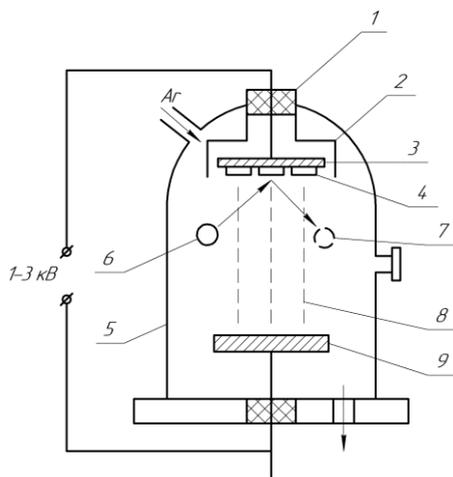


Рисунок 12 – Схематичное изображение установки ионно-плазменного травления в диодной камере:

- 1 – изолятор; 2 – экран; 3 – катод; 4 – подложки – мишени; 5 – вакуумная камера; 6 – бомбардирующий ион; 7 – частица распыляемого материала;
- 8 – плазма тлеющего разряда; 9 – анод

Подложки – мишени крепятся на катоде. Производится откачка атмосферы из вакуумной камеры и напуск аргона через специальный клапан. Между катодом и анодом прикладывается напряжение 1–3 кВ, что при пониженном давлении в камере (0,1–1 Па) приводит к возникновению тлеющего разряда, обусловленного эмиссией электронов высоких энергий с катода.

Положительные ионы возбужденного газа, разгоняясь электрическим полем, обеспечивают травление мишеней. На постоянном токе в диодных камерах можно травить только хорошо проводящие материалы. При плохой проводимости материала на нем накапливается положительный заряд бомбардирующих ионов, который приводит к срыву процесса травления. Для преодоления этого эффекта применяют травление на ВЧ токах. На отрицательной полуволне происходит травление материала мишени, а на положительной нейтрализация накопленного заряда за счет бомбардировки электронами из плазмы.

С одной стороны травление в диодных камерах – это простой и надежный способ физического распыления загрязнений и материалов при относительно небольших затратах. Но с другой стороны, как это можно видеть на рисунке 12, углы падения ионов на мишени практически равны 90° . Это говорит о том, что эффективность распыления мала, повышение энергий ионов не приведет существенному росту скорости распыления, зато вызовет значительный перегрев подложек и сильные радиационные разрушения кристаллической структуры материала. Это, вместе с возможностью загрязнения приповерхностных слоев аргоном, делает данный способ не очень эффективным и востребованным.

В триодных камерах (рисунок 13) травление производится при более высоком вакууме (0,01–0,1 Па). Для поддержания дугового разряда при таком давлении требуется большее количество электронов высоких энергий для ионизации газа. Для этого применяется термоэмиссионный катод. Разряд достигается при более низких напряжениях 100–300 В.

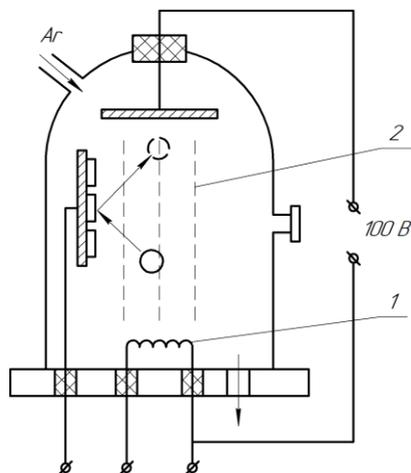


Рисунок 13 – Схематичное изображение установки ионно-плазменного травления в триодной камере:

1 – термоэмиссионный катод; 2 – плазма дугового разряда

Мишени – подложки располагаются на дополнительном третьем отклоняющем электроде, на который подается отрицательное напряжение для вытягивания положительно заряженных ионов из плазмы дугового разряда.

Введение дополнительных элементов конструкции термоэмиссионного катода и электрода с мишенями приводит к увеличению факторов, воздействующих на процесс распыления. Он становится более управляемым за счет независимого регулирования количества и энергии ионов в плазме и за счет автономного управления энергией бомбардировки ионами мишеней. То есть можно утверждать, что управление данным процессом усложняется, но при этом увеличивается точность формирования локального рельефа.

Кроме того, углы падения ионов на мишени в триодных камерах существенно отличаются от 90° , а это говорит о большей эф-

фективности распыления материала, что подразумевает большие скорости травления. Так что, данный процесс является технически более сложным и затратным (термоэмиссионные катоды дороги и часто выходят из строя), но более предпочтительным при локальном прецизионном травлении микрорельефа при формировании структуры ИМС.

Ионно-лучевое травление выполняют в вакуумных установках (рисунок 14), в которых «луч» ионов формируется специальным газоразрядным источником и системами вытягивания и ускорения ионов.

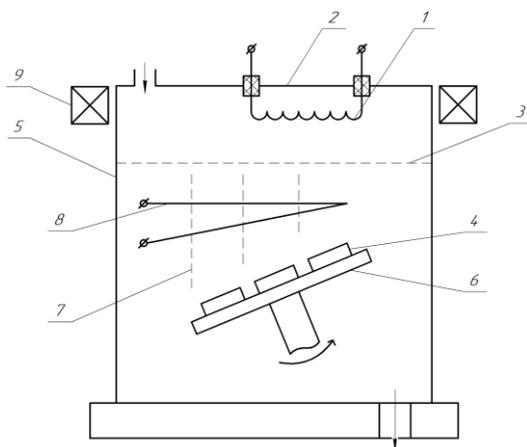


Рисунок 14 – Схематичное изображение установки ионно-лучевого травления: 1 – термоэмиссионный катод; 2 – разрядная камера источника ионов; 3 – смещаемые сетки для вытягивания ионов; 4 – подложки; 5 – рабочая камера; 6 – вращающийся столик и подложкодержатели; 7 – ионный луч; 8 – нейтрализатор заряда ионов; 9 – индукционная система

Давление инертного газа в источнике (около 0,1 Па) должно быть достаточным для создания газоразрядной плазмы. Равно-

мерность травления достигается равномерностью плотности тока и энергии по сечению луча.

Итак: электроны, эмитируемые термокатодом, бомбардируют атомы аргона, позволяя зажечься тлеющему разряду, возбуждаемому индукционной системой. Электрическое поле, создаваемое сетками, вытягивает ионы из разрядной плазмы и ускоряет их. Нейтрализатор заряда ионов гасит их положительный заряд. Затем уже нейтральные атомы аргона ускоренные полем вытягивающих сеток бомбардируют поверхность мишеней, находящихся на вращающемся столике. Угол наклона данного столика регулирует угол падения ионов, а его вращение обеспечивает равномерность травления по всей площади поверхности. Давление в рабочей камере при этом 0,04 Па, значительно меньше, чем в камере источника ионов или как говорят в разрядной камере.

Таким образом, мишени расположены вне плазмы газового разряда. Это позволяет еще более точно, чем в триодной камере, регулировать параметры процесса: энергию ионов, плотность тока ионного луча и угол падения независимо друг от друга.

Отличительные особенности:

- универсальность (любые поверхности любых материалов);
- низкая избирательность (материал контактной маски травится почти с такой же скоростью, как и материал подложки).

Если проанализировать вышеописанные способы физического сухого травления, то можно выделить ряд примечательных особенностей. Достоинства ионного травления:

- преимущественное травление в направлении нормали к поверхности, что позволяет получить хорошие результаты при локальном травлении (отсутствует подтравливание);
- безинерционность (достаточно отключить питание и травление прекратится, что невозможно в случае химического процесса).

Недостатки:

- низкие скорости травления 0,1–1 нм/с;
- значительные радиационные и тепловые воздействия;
- необходимость охлаждения образцов;
- большая техническая сложность, что ограничивает применение в исследовательских целях.

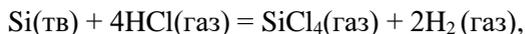
4.3.4. Химическая сухая очистка и травление

Сущность процесса заключается в химическом взаимодействии обрабатываемого материала с материалами различного рода.

Газовое травление

Травитель – представляет собой газообразное вещество; продукты травления – легколетучие химические соединения. В качестве травителя подложек используются галогены, галогеноводороды, соединения серы, пары воды.

Например: травление кремния HCl (хлористый водород):



травление сапфира водородом:

$\text{Al}_2\text{O}_3(\text{тв}) + 2\text{H}_2(\text{газ}) = \text{AlO}(\text{газ}) + \text{H}_2\text{O}$ (газ при данной температуре), (при T – 1200–1600°C – полирующее травление).

Газовое химическое травление, по сравнению с другими химическими процессами обладает рядом преимуществ:

- более чистые поверхности, чем при жидком травлении;
- отсутствие осаждения продуктов реакции на очищаемую поверхность;
- более точное управление за счет возможности прекращения подачи травителя в зону реакции.

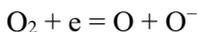
Но и ему присущи свои недостатки:

- высокая температура при которой происходят данные реакции (а значит ограничение по применению к структурированным подложкам);

- необходимость использования особо чистых газов травителей (особочистые вещества, как правило, стоят дорого и их использование в разы повышает себестоимость изделия).

Плазмохимическое травление проводится в вакуумных установках с использованием плазмы газового разряда. Основано на использовании обладающих большой реакционной способностью химически активных частиц в плазме газового разряда. Плазмообразующие газы выбирают исходя из свойств обрабатываемых материалов. Для обеспечения требуемых параметров травления в плазму дополнительно вводят аргон, кислород и азот.

Наиболее часто для травления кремния используют смесь Фреона-14 CF_4 с (2...8%) кислорода. Фреон химически инертен практически на любых температурах. Химически активные частицы образуются уже в плазме за счет энергетического возбуждения электронами высоких энергий:



То есть образуются химически активные к кремнию вещества CF_3 и F , которые вступают в реакцию с кремнием. Травление сопровождается выделением чистого углерода. Именно поэтому в камере присутствует кислород, который активизируется за счет ионизации. Кислород вступает в реакцию с углеродом и образует легколетучие соединения типа CO и CO_2 .

Травление производят в камерах диодного типа. Пластины – мишени при этом изолированы от катода, дабы исключить ионную бомбардировку.

Реактивное ионное травление (ионно-химическое) – комбинированный метод, заключающийся в том, что частицы материала распыляются ионной бомбардировкой (как в ионном травлении), а затем вступают в реакции и создают легколетучие соединения. От

плазмохимического травления его отличают большие энергии ионов, достаточные для распыления материала.

По аналогии с ионно-плазменным травлением можно выделить реактивное ионно-плазменное травление (подложки находятся в плазме газового разряда) и реактивное ионно-лучевое травление (лучок ионов получается в автономном источнике). Оборудование для реактивного ионного травления аналогично установкам ионно-плазменного травления.

Благодаря химическим реакциям реактивное ионное травление протекает с большими (в 3...15 раз) скоростями и с более высокой избирательностью (в 2...10 раз) (разность скорости травления материала, маски и подложки). Для предотвращения радиационного повреждения подложек травление может производиться с превышением скоростей химических реакций над скоростями разрастания радиационных дефектов вследствие ионной бомбардировки.

4.4 Эпитаксия [5]

Эпитаксия, как понятие, известна уже более ста лет. Однако, как технологический процесс, используемый в микро- и нанoeлектронике, она начала приобретать значение последние 3–4 десятка лет. Первоначально использовались только автоэпитаксиальные процессы в технологии полупроводников, позднее происходит развитие и все более широкое использование гетероэпитаксии.

Автоэпитаксия – это ориентированный рост относительно тонкого слоя одного материала на ориентирующей подложке того же самого материала, например, кремний на кремнии. Гетероэпитаксия – это процесс ориентированного роста слоя материала на ориентирующей подложке другого материала, то есть в гетероэпитаксии участвуют уже два материала, например кремний, выращиваемый на сапфире.

Прежде всего, следует пояснить суть терминов ориентированное и ориентирующее. Если представить себе идеальный монокристалл вещества, например полупроводника, увеличенным до размеров, когда видны отдельные атомы, то на поверхности такого монокристалла должны находиться оборванные связи, к которым не присоединен следующий атомарный слой.

Наличие таких оборванных связей приводит к возникновению на поверхности кристалла потенциального микрорельефа, так как каждая связь – это потенциальная яма для атомов, попадающих на поверхность. Поэтому, при осаждении тем или иным способом атомов вещества на поверхность монокристаллической подложки, она оказывает ориентирующее действие на расположение данного атома (рисунок 15). Ибо наиболее вероятным представляется нахождение такого атома в потенциальной яме с образованием устойчивой связи, что и породило данные термины.

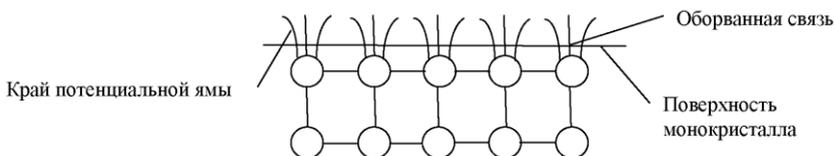


Рисунок 15 – Схема, объясняющая термины ориентированное и ориентирующее

Конечно, в идеальном случае, если наращивается то же самое вещество, то осуществляется простая достройка имеющегося монокристалла. Такой механизм принято называть механизмом псевдоморфного роста. Он реализуется при автоэпитаксиальном наращивании и иногда при гетероэпитаксиальном в случае большого сходства кристаллических решеток подложки и растущего слоя и близости параметров элементарных ячеек. В тонких слоях не-

большое рассогласование решеток может быть скомпенсировано за счет возникновения механических напряжений в пленке или за счет кристаллографических дефектов типа краевых дислокаций несоответствия.

В других случаях предполагается другой механизм роста в соответствии с так называемой теорией решетки совпадающих узлов (РСУ). Которая утверждает, что рост возможен за счет большого процента совпадения элементарных связей кристаллической решетки растущего слоя и подложки. Например, при кратном отличие размеров элементарных ячеек или при практически полном совпадении поверхностных рисунков в расположении атомов подложки и растущего слоя на границе раздела не предусматривающее кристаллографического совпадения элементарных ячеек.

Существует огромное количество разновидностей эпитаксиальных процессов от общеизвестных и признанных, до весьма экзотических. Но для нормальной реализации всех процессов необходимо соблюдение ряда условий:

- Поверхность ориентирующей подложки должна стремиться к состоянию идеального монокристалла.
- Поверхность подложки и вещество, поступающее на эту поверхность, должны быть как можно чище (чистота подложки = свободные связи, а чистота вещества = отсутствие искажения параметров кристаллической решетки).
- Атом осаждаемого вещества должен иметь достаточную энергию для длительного времени жизни на поверхности и способности к перемещению по поверхности для отыскания минимума потенциальной энергии (то есть для встраивания в растущий монокристалл слоя оптимальным образом).

Все эпитаксиальные процессы могут быть разделены на две большие группы: со средой носителем и без нее. В особую группу следует отнести понятие искусственной эпитаксии.

К первой группе относят наиболее широко используемые в настоящее время в полупроводниковой технологии процессы газофазной (ГФЭ) и жидкофазной (ЖФЭ) эпитаксии, а ко второй группе принадлежат так называемые вакуумные процессы, в том числе наиболее совершенные на данный момент процессы молекулярно-лучевой (МЛЭ) или иначе молекулярно-пучковой (МПЭ) эпитаксии. Рассмотрим более подробно эти наиболее значимые виды эпитаксиальных процессов.

4.4.1. Жидкофазная эпитаксия

Жидкофазная эпитаксия – это процесс ориентированного роста слоя вещества из среды типа раствора-расплава. Это один из наиболее освоенных и массовых процессов, используемых в технологии ЭКБ. Его суть сводится к погружению в переохлажденный тем или иным способом раствор-расплавы монокристаллической подложки.

Раствор-расплав содержит тугоплавкий наносимый материал (например кремний Si) и легкоплавкий металл-растворитель типа Ga, In, Sn, Pb, Bi и др. В результате температура плавления такого раствора-расплава значительно ниже точки плавления наносимого материала и выше температуры плавления металла-растворителя. При незначительном переохлаждении такого сплава достаточно ввести в него центр кристаллизации – затравку (в нашем случае подложку) и на ней начнется осаждение более тугоплавкого компонента раствора-расплава. Этот метод позволяет получить достаточно хорошие слои осаждаемого вещества, но имеет ограничение на возможность гетероэпитаксиального наращивания. Согласно исследованиям ЖФЭ не может происходить при рассогласовании параметров элементарной ячейки кристаллической решетки более чем 2%. Кроме того, материалы осаждаемый и растворитель должны быть изовалентны, иначе возможно легирование и образование сплавов.

Этот процесс, с одной стороны, практически можно считать технологическим совершенством. Он обладает очень большим количеством достоинств:

- Простота и технологичность (для его осуществления требуется довольно простое оборудование типа подогреваемой до нужной температуры ванны, которая находится в инертной атмосфере).
- Массовость (что подразумевает одновременную обработку большого числа подложек с получением практически идентичных параметров выращенного слоя).
- Относительно высокое качество эпитаксиальных слоев при автоэпитаксиальном наращивании.
- Возможность предварительной очистки и обработки подложки в процессе (подложку можно погрузить не в переохлажденный раствор-расплав, а наоборот в перегретый, где она частично растворится вместе с загрязнениями и механически нарушенным слоем).

Но с другой стороны этому технологическому методу присущи и существенные недостатки, которые ограничивают его область применения:

- Жесткие требования к материалам подложки и пленки по кристаллографическому рассогласованию (практическое отсутствие возможности гетероэпитаксии).
- Возможность загрязнения пленок металлом – растворителем (если присмотреться, то многие из перечисленных металлов растворителей служат легирующими примесями для кремния, например).
- Высокие температуры подложек при их обработке близкие к T плавления (это позволяет использовать данный метод только для обработки неструктурированных подложек, так как при высоких температурах ускоряются процессы диффузии в материале подложки).

Поэтому областью применения ЖФЭ служит в основном предварительная подготовка подложек перед дальнейшим формированием структуры, то есть элементов ЭКБ. Что и позволяет решить например вопрос с теплоотводом в планарной технологии.

4.4.2. Газофазная эпитаксия

Основой газофазной эпитаксии являются реакции восстановления, разложения и диспропорционирования газов носителей. Упрощенная типовая схема установки выглядит, как показано на рисунке 16.

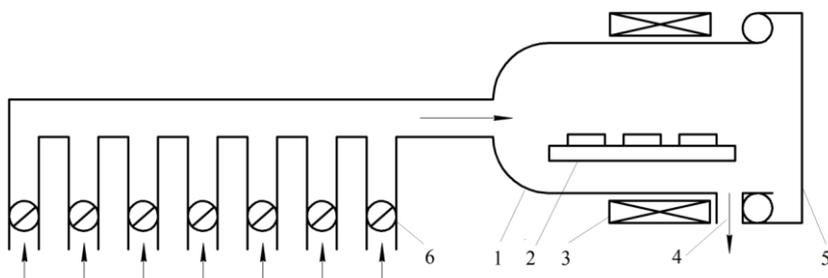
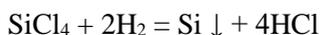


Рисунок 16 – Упрощенная типовая схема установки ГФЭ:

- 1 – кварцевый реактор; 2 – подложкодержатель типа графитовой лодочки с подложками; 3 – ВЧ нагреватель (позволяет нагреть только проводящий материал подложек); 4 – система выпуска продуктов реакции;
- 5 – затвор для загрузки подложек в реактор; 6 – вентили-дозаторы

Для эпитаксиального наращивания кремния в технологическом методе ГФЭ наиболее распространен хлоридный метод. Процесс начинается с загрузки подложек в камеру кварцевого реактора и нагрева их до температуры порядка 1200°C. Затем, через входные трубки и систему вентилей дозаторов в камеру подаются различные газовые смеси. Для начала камеру от атмосферного воздуха продувают водородом H_2 и заполняют смесью HCl и H_2

для сухого газового травления поверхности подложек. При этом стравливается с пластин не только адсорбированные загрязнения типа SiO_2 , но и слой в несколько микрометров (механически нарушенный трещиноватый слой). После очистки подачу HCl прекращают и в камеру реактора, нагретую до $1150\text{--}1300^\circ\text{C}$, подается смесь газов. Газом носителя кремния является тетрахлорид кремния SiCl_4 и водорода H_2 выполняющего роль газа восстановителя. На нагретых поверхностях подложек происходит реакция с восстановлением чистого кремния.



Скорость роста слоя при этом примерно $0,5$ мкм/мин. Продукт реакции HCl , находящийся при данных температурах в газообразном состоянии, выводится через систему удаления из зоны реакции.

В процессе выращивания слоев легко обеспечить их управляемое легирование двумя способами:

1) введением в раствор SiCl_4 летучих примесных газообразных соединений типа хлоридов фосфора или сурьмы, которые испаряются вместе с ним;

2) введением примесного газа в реакционную камеру отдельным газовым потоком разбавленным водородом.

При этом происходит параллельное выделение чистой примеси с встраиванием ее в растущий слой.

Параметры и скорости роста совершенного монокристаллического слоя зависят от многих факторов:

1. Температура подложки, чем больше T подложки, тем больше скорость и качество (структурное совершенство) растущего слоя. Это обусловлено увеличением подвижности атомов растущего материала на поверхности подложки. Они быстрее занимают положенные им места. При хлоридном методе скорости составляют, примерно, $1100^\circ\text{C} - 0,1$ мкм/мин, $1200^\circ\text{C} - 1$ мкм/мин.

2. От скоростей и состава поступающих газов, то есть от соотношения SiCl_4 и H_2 .

3. Степень чистоты процесса (очистка подложки, чистота газов, реактора и т.д.)

Кроме хлоридной может использоваться силановая технология с газом носителем SiH_4 . Для эпитаксии металлов таким методом используют тоже газы носители. Так для Al , AlCl_3 и AlI_5 .

4.4.3. Молекулярно-лучевая или молекулярно-пучковая эпитаксия

Известно огромное число способов нанесения пленочных материалов без среды носителя, то есть в вакууме, в том числе и эпитаксиальных. Причем каждый последующий способ возникает, дабы искоренить недостатки предыдущего. Наиболее интересным эпитаксиальным способом является молекулярно-пучковая или молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). Основное отличие МЛЭ от других аналогичных процессов состоит в двух аспектах:

1. Это соблюдение условия чисто атомарного течения испаряемого вещества, когда оно осаждается на подложку только в виде атомарного газа. То есть газа не содержащего кластеры (более крупные частицы), и атомы в пучке не испытывают в процессе переноса от источника до подложки ни одного соударения между собой и с молекулами остаточного газа атмосферы в рабочей камере.

2. Это термодинамика самого процесса. При МЛЭ рост пленки происходит в условиях термодинамического "квазиравновесия", устанавливающегося только непосредственно на подложке. Это утверждение на первый взгляд кажется парадоксальным поскольку различия в температуре испаряемого вещества и подложки значительны в отличие от практически равновесных систем при газофазной и жидкофазной эпитаксиях. Однако, поскольку, с одной стороны плотность потока осаждаемого на подложку вещества

низка и атомарный газ очень быстро достигает температуры подложки. А с другой стороны, время жизни атома на поверхности достаточно велико (он может переменить до 10^6 мест до момента встраивания в кристаллическую решетку растущего слоя), то при описании процессов, протекающих в системе газ-подложка, правомерно говорить о локальном равновесии. Это позволяет говорить о достижении атомом вещества положения минимальной свободной энергии при отсутствии факторов загрязняющих растущую пленку, то есть о достижении наилучших кристаллических параметров пленки.

Технически эти два условия протекания МЛЭ достигаются:

1. Путем испарения вещества из так называемой эффузионной ячейки. Давление пара внутри ячейки значительно выше давления в формируемом пучке. Капля испаряемого вещества находится в практически замкнутом пространстве ячейки. При термическом испарении добиться отделения от капли только отдельных атомов нельзя. Вместе с атомами от капли отрываются кластеры и даже микрокапли. Но они не улетают сразу в рабочее пространство камеры, а попадают на нагретые стенки камеры и претерпевают многократные реиспарения. В результате чего на выходе ячейки имеет место практически чисто атомарный газ. Схема эффузионной ячейки (рисунок 17).

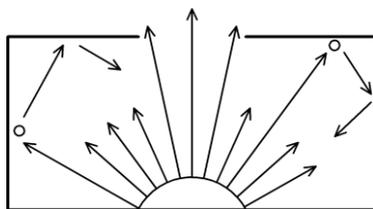


Рисунок 17 – Упрощенная схема работы эффузионной ячейки

2. Снижением скорости роста пленки до минимума (обычно говорят, что при МЛЭ оптимальная скорость роста составляет, порядка, 1 монослой/с, то есть при размерах атомов примерно 1 ангстрем скорость роста составит от 0,1 до 1 нм/с).

3. Высокой температурой подложки (верхняя граница задается при столь малых скоростях балансом между скоростью осаждения и реиспарения осаждаемого вещества). Абсолютная величина может быть различной в зависимости от вида осаждаемого материала и типа подложки. Однако реально T подложки значительно ниже, чем в двух ранее рассмотренных процессах 300–600°C

4. Высокой степенью вакуума до 10^{-8} мм.рт.ст. Последнее утверждение, однако, отчасти спорно так как существуют работы в которых наоборот достигнуты лучшие результаты при более низком вакууме (это объясняют тем, что первоначальное осаждение происходит на подложку с адсорбированным остаточным газом, что приводит к потере энергии осаждаемого атома и, следовательно, к увеличению центров зарождения островков, а следовательно к облегчению коалесценции без конкуренции между разно ориентированными островками). Тем не менее, данное утверждение можно принять за аксиому, так как чем выше степень вакуума, тем выше общая чистота процесса.

Полупроводниковые кремниевые слои получают испарением кремния, нагретого на 100°C выше чем T плавления. При этом скорости роста достаточно высоки до 4 мкм/мин. Для обеспечения чистоты нагрев источника растущего материала производится электронным лучом по следующей схеме (рисунок 18).

Регулирование скорости роста осуществляется только регулировкой температуры источника. Конденсация производится на пластины, нагретые до температур 400–600°C. При меньших температурах растут поликристаллические слои. При больших увеличивается диффузия из подложки и автолегирование.

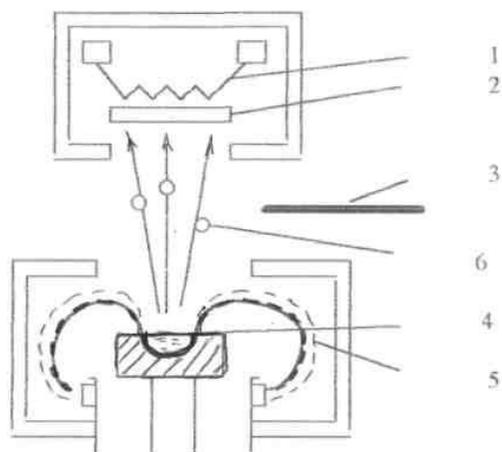


Рисунок 18 – Упрощенная типовая схема эпитаксиального наращивания кремния при МЛЭ с испарением мишени электронным лучом:

- 1 – нагреватель подложки; 2 – подложка; 3 – заслонка;
- 4 – участок расплавленного материала мишени в эффузионной ячейке;
- 5 – электронный луч; 6 – частицы испаряемого кремния

Легирование в МЛЭ осуществляется двумя способами:

1. Легирование из молекулярного потока. При этом испарение легирующих примесей производят в основном из тиглей. В качестве примесей при данном способе применяют сурьму, галлий, алюминий.

2. Легирование внедрением ускоренных ионов выполняют малоэнергетическими пучками 0,1...3 кэВ при небольших токах 1 мкА. Способ позволяет применять многие примеси, в том числе и наиболее употребимые Р, As, В. Управляемость процессом значительно выше. Изменяя параметры ионного луча в процессе эпитаксиального роста, можно получить профили легирования, невозможные для процессов осаждения из парогазовой фазы.

МЛЭ производится в специальных сверхвысоковакуумных камерах с безмасляной откачкой. Перед нанесением эпитаксиальных слоев пластины подвергают ионной очистке и отжигу.

Достоинства МЛЭ:

- 1) высокая степень чистоты процесса, что позволяет значительно снизить число и плотность дефектов в эпитаксиальных слоях;
- 2) низкая температура подложек уменьшает диффузию из них и автолегирование, что также способствует росту качества слоев;
- 3) высокая точность управления процессом легирования слоев и безинерционность процесса за счет использования перекрывающей заслонки;
- 4) совместимость с другими сухими и вакуумными процессами интегральной технологии, что создает возможность непрерывного технологического цикла.

Недостатки МЛЭ:

1. Процесс не массовый и малопроизводительный, обработка только одной подложки, да и то довольно локально, что определяется точечным источником испаряемого вещества.
2. Очистка подложки не в процессе, а предварительная (фактически в рабочей камере эпитаксиальной установки возможен только отжиг).
3. Очень сложное и дорогостоящее (в том числе в эксплуатации) оборудование для реализации процесса.
4. Исходя из выше сказанного мы можем сказать, что массовое применение МЛЭ в полупроводниковой технологии ограничивается сложностью и высокой стоимостью оборудования.

4.4.4. Искусственная эпитаксия

Основное отличие искусственной эпитаксии от рассмотренных выше способов заключается в том, что для ее осуществления пытаются применить нетрадиционные материалы подложек.

Монокристаллы – это дорого и неудобно, так как возможности гетероэпитаксии сильно ограничены требованиями к кристаллическим решеткам двух материалов.

Предположим нам надо вырастить эпитаксиальный слой металла на SiO_2 . Традиционными методами это пока невозможно. Однако доказана возможность получения довольно приличных слоев даже на аморфных подложках при условии создания искусственного микрорельефа двумя способами:

- 1) термический;
- 2) механический.

Предположим, что на поверхности подложки методом лазерного сканирования создается искусственный энергетический микрорельеф, например, такой как показан на рисунке 19.

Очевидно, что атомы осаждаемого вещества будут терять свою энергию в ячейках данной сетки и таким образом осаждаться преимущественно там, что позволит сформировать структурирование растущего слоя.

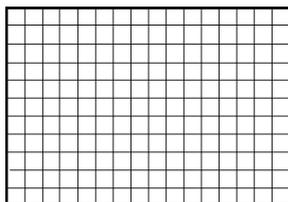


Рисунок 19 – Подложка с сеткой энергетического микрорельефа

Главным препятствием реализации данного плана является практическая невозможность формирования микрорельефа с атомарным разрешением (как у монокристаллической подложки). Поэтому искусственная эпитаксия не находит широкого применения.

4.5. Формирование маскирующих и пассивирующих диэлектрических слоев

В настоящее время доминирующим материалом электроники является кремний. В качестве маскирующих материалов выступают диоксид кремния SiO_2 при легировании бором и нитрид кремния Si_3N_4 при легировании Al, Zn и Ga, так как они имеют больший коэффициент диффузии в пленках SiO_2 чем в пленках Si_3N_4 . Иногда, в особых случаях, когда требуется высокое разрешение литографических процессов, применяют металлические маски, представляющие собой тонкие пленки металлов, нанесенные на поверхность кремния или других материалов для формирования топологии ИМС.

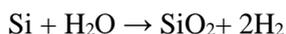
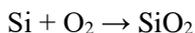
Окисление кремния – одни из самых характерных процессов в технологии современных ИМС. Получаемая при этом пленка двуокиси кремния (SiO_2) выполняет несколько функций в том числе:

- защиты, в частности, пассивации участков p-n переходов, выходящих на поверхность;
- маски, через окна которой вводятся необходимые примеси при локальном легировании (диффузионном или ионном);
- тонкого диэлектрика вод затвором МОП-транзистора;
- в качестве диэлектрика межуровневой изоляции систем металлизации.

В технологии ИМС различают «толстые» и «тонкие» окислы SiO_2 . Толстые окислы ($d = 0,7-0,8$ мкм) выполняют функции защиты и маскирования, а тонкие ($d = 0,1-0,2$ мкм) – функции подзатворного диэлектрика в МОП транзисторах.

Одной из важных проблем при выращивании пленки SiO_2 является обеспечение ее однородности. В зависимости от качества поверхности пластины, от чистоты реагентов и режима выращивания в пленке возникают те или иные дефекты. Распространенным типом дефектов являются микро- и макропоры, вплоть до сквозных отверстий (особенно в тонком окисле).

Искусственное окисление кремния осуществляется обычно в окислительных печах, подобных тем, которые используются для диффузии в потоке газа-носителя или при газофазной эпитаксии (см. рисунок 16, с. 71) при высокой температуре (1000–1200°C). Основу таких печей составляет, как и при диффузии, кварцевая труба с пластинами кремния, нагреваемая либо токами высокой частоты, либо иным путем. Через трубу пропускается поток кислорода (сухого или увлажненного) или пары воды, которые реагируют с кремнием в высокотемпературной. Окисляющим агентом обычно является кислород или пары воды при давлении, равном атмосферному:



Получающийся оксид по свойствам близок к плавленому кварцу, имеет аморфную структуру и практически однороден по толщине.

Коэффициент диффузии O_2 несколько выше, чем коэффициент диффузии паров воды, однако, по крайней мере, при атмосферном давлении растворимость паров воды в SiO_2 приблизительно на три порядка величины больше, чем растворимость O_2 . Поэтому окисление в парах воды идет в десятки раз быстрее, чем в кислороде. Например, для выращивания пленки SiO_2 толщиной 0,5 мкм в сухом кислороде при 1000°C требуется около 5 ч, а во влажном – всего 20 мин. С уменьшением температуры на каждые 100°C время окисления возрастает в 2–3 раза.

Качество окисной пленки повышается с уменьшением температуры при выращивании, а также при использовании сухого кислорода. Поэтому тонкий подзатворяющий окисел, от качества которого зависит стабильность параметров МОП-транзистора, и изолирующие диэлектрические слои на поверхности кремния под металлизацию

цией получают сухим окислением. При выращивании толстого окисла, выполняющего функции маски при диффузии примесей чередуют сухое и влажное окисление: первое обеспечивает отсутствие дефектов, а второе позволяет сократить время процесса.

В последнее время начали все шире использоваться методы термического окисления при умеренно повышенных давлениях (приблизительно до 6–10 атм) и температурах, типичных для обычного термического окисления. Этот метод позволяет в несколько раз увеличить скорость окисления при сохранении других качеств пленок, которые получаются при атмосферном давлении.

Следует отметить и некоторые особенности окисления кремния при пониженных давлениях окислителя (меньше атмосферного). В этом случае могут формироваться пленки монооксида (SiO). Этот оксид при температурах выше 1200–1250°C испаряется заметно легче, чем кремний или его диоксид. В результате может наблюдаться не окисление, а травление кремния.

Установлено, что чистая поверхность Si в O_2 начинает окисляться очень быстро, и пленка SiO_2 толщиной порядка нескольких нанометров успевает образоваться за единицы секунд.

Механизм окисления имеет два варианта. Первый состоит из следующих этапов:

- 1) диффузия атомов кремния через уже имеющуюся пленку окисла к поверхности;
- 2) адсорбция молекул кислорода поверхностью из газовой фазы;
- 3) собственно окисление, т. е. химическая реакция.

В этом случае пленка нарастает над исходной поверхностью кремния. Второй вариант состоит из следующих этапов:

- 1) адсорбция кислорода поверхностью уже имеющегося окисла;
- 2) диффузия кислорода через окисел к еще не окисленному кремнию;
- 3) собственно окисление.

В этом случае пленка нарастает вглубь от исходной поверхности кремния. На практике оба механизма сочетаются, но главную роль обычно играет второй.

Экспериментально установлено, что окислитель диффундирует в оксиде гораздо быстрее, чем Si, и поэтому рост оксида идет преимущественно на границе раздела Si – SiO₂.

При протекании процесса окисления граница раздела Si – SiO₂ двигается в глубину кремниевой подложки. Однако происходящее при этом расширение объема приводит к тому, что внешняя поверхность пленки SiO₂ не совпадет с первоначальной поверхностью кремния. Если обратиться к значениям плотности и молекулярному весу Si и SiO₂ можно показать, что рост окисной пленки толщиной d происходит за счет слоя кремния толщиной 0,44 d.

Очевидно, что скорость роста оксида со временем должна убывать, так как новым атомам кислорода приходится диффундировать через все более толстый слой оксида. Легированный кремний также окисляется несколько быстрее нелегированного.

Оксид кремния относится к числу наиболее высококачественных диэлектриков.

Роль, которую выполняет пленка SiO₂ определяет возможность использования того или иного метода ее получения.

Для использования в качестве межуровневой изоляции или защитного слоя, наносимого поверх металлизации можно использовать химическое осаждение из газовой фазы. Защитные слои часто наносятся также пиролизом.

Слои, используемые в качестве масок при локальном легировании, обычно получают термическим окислением. На практике нередко используется комбинированный режим окисления, когда начальный этап окисления ведется в атмосфере сухого O₂, затем в атмосфере паров воды, после чего опять следует окисление в сухом O₂. Длительности этих трех процессов выбираются приблизи-

тельно равными. Первый этап окисления задает структуру границы раздела Si–SiO₂. Во время второго этапа формируется основная толщина пленки. Третий этап является термообработкой, в процессе которой понижается концентрация растворенной в пленке воды, толщина пленки при этом увеличивается незначительно. Такая методика позволяет сравнительно быстро получать слои SiO₂, по свойствам приближающиеся к получаемым в атмосфере сухого кислорода. Для получения маскирующих слоев используют также методы химического осаждения из газовой фазы. Особенно это касается слоев Si₃N₄. Наиболее распространены два способа, реализуемых в кварцевых реакторах аналогичных описанным выше (см. рисунок 16, с. 71):

1. Пропускание дихлорида-дигидрида SiCl₂H₂ кремния в аммиаке NH₃.

2. Химическое осаждение из парогазовой фазы.

Наиболее высококачественные слои SiO₂ для МДП структур получают только термическим окислением в атмосфере сухого кислорода. Для МДП структур на основе иных полупроводниковых соединений используют методы химического осаждения из газовой фазы или анодирования.

4.6. Методы формирования топологии микросхем

Литография, как технологический процесс появилась в 1957 году и определила развитие электроники, позволяя создать интегральные микросхемы. В настоящее время – это самый универсальный технологический процесс, позволяющий создавать сложные рисунки с размерами значительно менее микрометра.

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

Фоторезисты (на практике просто резисты) – это материалы чувствительные к излучению определенной длины волны – актиничному излучению. Процессы, происходящие под действием излучения в резистах, необратимо меняют их стойкость к специальным растворам проявителей.

Резисты, растворимость которых в проявителе повышается после облучения, называют позитивными. И наоборот, резисты, растворимость которых уменьшается, называют негативными резистами.

Экспонирование осуществляется либо теневым способом, то есть созданием затеняющих масок – шаблонов, либо локализацией самого излучения (с помощью проецирования изображения).

Этапы и основные операции литографического процесса:

1. Формирование слоя резиста:

- a) подготовка поверхности;
- b) нанесение резиста;
- c) термообработка (первая сушка).

2. Передача рисунка на слой резиста:

- a) совмещение и экспонирование;
- b) проявление резиста;
- c) вторая термообработка.

3. Передача рисунка на материал ИМС:

- a) удаление материала микросхемы или нанесение материала;
- b) удаление резистивной маски.

Методы литографии применяемые в промышленном производстве ЭКБ классифицируются (рисунок 20):

- по типу воздействующего на резист излучения (оптическая, рентгеновская, электронная, ионная);
- по длинам волн данного излучения (стандартная, глубокий и сверхглубокий УФ);
- по принципу передачи рисунка (сканирующая, проекционная).

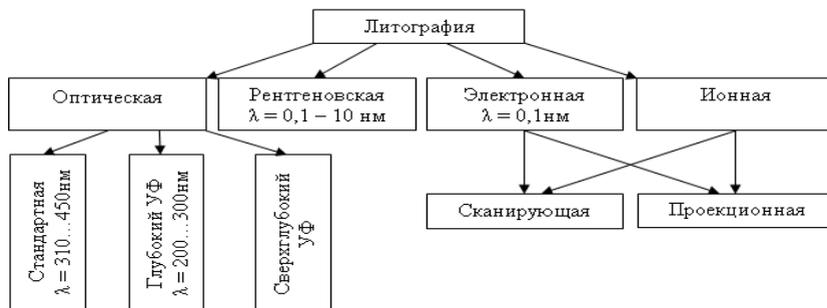


Рисунок 20 – Классификация методов литографии, применяемых в промышленном производстве

Как известно, разрешающая способность литографических процессов зависит от длины волны облучающего излучения. Четыре основных типа расположены в порядке повышения разрешающей способности.

Процессы оптической литографии относительно просты и хорошо описываются последовательностью этапов, приведенной выше стоит только сказать, что в качестве излучения используется оптический диапазон от простого до сверхглубокого ультрафиолета. И для промышленного применения этот технологический метод формирования топологии наиболее приемлем при современном развитии техники, так как обладает по сравнению с другими целым рядом достоинств:

- 1) не требует специальной атмосферы или вакуума в процессе воздействия на резист;
- 2) метод технически довольно прост и хорошо освоен, имеются отработанные технологические установки;
- 3) резисты достаточно чувствительны к УФ излучению и обладают хорошей избирательностью;
- 4) высокая производительность, что обусловлено отсутствием необходимости создания вакуума;

5) возможность использования как теневого (масочного) так и локализованным излучением воздействия на резист.

Тем не менее, как всегда есть и существенные недостатки:

1) с уменьшением длины волны происходит резкое удорожание технических средств;

2) разрешающая способность ограничивается дифракционным пределом в процессе передачи рисунка особенно теньвым способом.

4.6.1. Электронная литография

Поскольку электронная и ионная литографии практически идентичны между собой, рассмотрим сначала электронную и рентгеновскую литографии, а затем определим отличительные особенности ионно-литографических процессов. Благодаря чрезвычайно малой длине волны ускоренных электронов ЭЛ характеризуется практическим отсутствием дифракции и, следовательно, высокой разрешающей способностью. Длина волны электрона оценивается соотношением:

$$\lambda \approx 1,24 / \sqrt{U} ,$$

при $U = 100 \dots 10000$ В, $\lambda = 0,1 \dots 0,01$ нм.

Минимальные размеры элементов 0,2...1 мкм (не разрешающая способность!). Теоретический предельный размер 0,05 мкм.

Системы обладают высокой глубиной резкости, что снижает требования к плоскостности подложек. Электронный луч может быть использован для обнаружения меток, что повышает точность совмещения. Экспонирование выполняется в вакуумных установках, что обеспечивает чистоту процесса, но требует высокой автоматизации.

Электронное экспонирование основано на нетермическом взаимодействии ускоренных электронов с электронорезистом. Об-

ладая большой энергией, электроны разрывают почти все химические связи на своем пути.

Чувствительность электронорезистов определяется дозой заряда, при которой для позитивных резистов облученные участки проявляются на полную глубину, а для негативных – на облученных участках после травления остается 0,5 исходной толщины.

Чувствительность зависит от: энергии электронов, типа проявителя, условий проявления, толщины резиста и так далее.

Менее чувствительные резисты, для которых требуется большое время экспонирования, обеспечивают большее разрешение (повышение энергии приводит к повышению чувствительности, но также приводит к повышению рассеяния и реотражения и, следовательно, к уменьшению разрешения).

Электронорезисты – это органические материалы с большой молекулярной массой и высокой прозрачностью в видимом и УФ излучении. В наименовании марки: ЭРП – электронорезист позитивный, ЭРН – электронорезист негативный.

Электронная литография подразделяется на:

- сканирующую (сканирование сфокусированным лучом, перемещаемым по заданной программе);
- проекционную (с помощью широкого пучка электронов через шаблон с масштабом 1:1, 10:1, 30:1).

Сканирующая электролитография может быть осуществлена двумя способами: растровое и векторное сканирование (рисунок 21).

Сканирование как растровое, так и векторное ведется небольшими участками поверхности подложки, называемыми кадрами. При растровом сканировании луч перемещается по всей поверхности кадра от одного края до другого, включаясь и выключаясь в нужном месте (утолщения на линиях растра), формируя, таким образом, элементы рисунка в слое резиста. При векторном сканирова-

нии, луч перемещается от точки с условным началом координат до точки, где начинается формирование рисунка электронным лучом. После формирования первого элемента рисунка луч опять перемещается к точке с заданными координатами и начинает сканирование для формирования второго элемента рисунка и так далее.

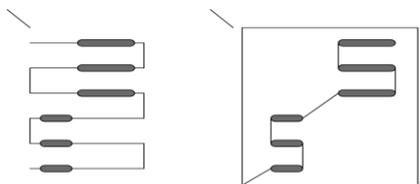


Рисунок 21 – Растровое (слева) и векторное (справа) сканирование

Оба способа имеют как достоинства, так и недостатки. Достоинства растрового сканирования:

- технически и программно реализуется проще;
- обеспечивает более высокую точность в процессе передачи рисунка на слой резиста.

Недостатки растрового сканирования:

- затрачивается существенно больше времени, чем на векторное сканирование.

Собственно достоинства и недостатки векторного сканирования зеркальны. Особо стоит отметить вопрос точности. При растровом сканировании точность обеспечивается реперными знаками кадра на весь рисунок. А вот при векторном, каждая точка задается координатами с определенным допуском, который может накапливаться при переходе от одного элемента рисунка к другому. Если таких элементов в кадре много, то начало координат последнего элемента может существенно сместиться.

Сканирование протекает в вакууме, а следовательно, все что отражено на рисунке находится внутри вакуумной камеры. В каче-

стве источника электронного луча используется электронная пушка. Луч фокусируется и смещается системой электромагнитных линз. Очень важным элементом является координатный столик, обеспечивающий точное перемещение закрепленной на нем подложки в двух координатах. Для обеспечения начального совмещения формируемого рисунка с уже сформированной структурой в подложке используются метки в виде тонких пленок металла, от которых фокусированный электронный луч отражается и электроны регистрируются счетчиком вторичных электронов. Схематичное устройство установки сканирующей электронной литографии можно изобразить, как показано на рисунке 22.

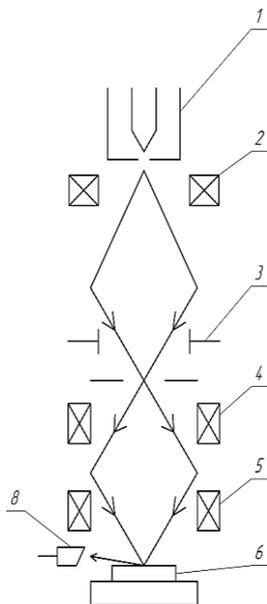


Рисунок 22 – Схематичное изображение установки электронной литографии, реализующей сканирование остросфокусированным лучом:

- 1 – электронная пушка; 2 – линза конденсора; 3 – пластины гашения луча; 4 – отклоняющие обмотки; 5 – проекционная линза; 6 – подложка;
- 7 – координатный столик; 8 – счетчик вторичных электронов

Основными достоинствами данного способа передачи рисунка являются:

- высокая точность, как совмещения, так и передачи рисунка;
- отсутствие необходимости в изготовлении шаблона;
- высокая степень чистоты процесса.

Основными недостатками можно считать:

- сложность и высокую стоимость технологического оборудования, причем как при покупке, так и при эксплуатации;
- низкую производительность данного оборудования.

Низкая производительность обусловлена тем, что сканирование, как говорилось выше, ведется кадрами, и размер кадра обычно не превышает 2×2 мм. Таким образом, чтобы произвести обработку одной подложки даже диаметром всего лишь 100 мм необходимо большое время. И даже если не учитывать время на подготовку и запуск установки (при наличии вакуумного транспорта) этот процесс не может быть рекомендован для крупносерийного или массового производства. Он по-прежнему остается исследовательским процессом, а также процессом для изготовления шаблонов для более высокопроизводительных литографических ТП.

Проекционная электролитография выполняется также двумя способами, которые условно можно назвать:

- без уменьшения изображения (без масштабирования);
- с уменьшением изображения (с масштабированием).

В первом случае используется специальный фотокатод, выполненный как показано на рисунке 23.

Фотокатод со стороны кварца облучают УФ излучением, диоксид титана, непрозрачен для УФ излучения. Он и создает рисунок (затеняющая маска), пленка палладия обладает высокой фотоэмиссией, что позволяет получить потоки фотоэлектронов с участков, не затененных диоксидом титана. Фотоэлектроны бомбарди-

руют поверхность электронорезиста. Отклоняющая система обеспечивает точность совмещения по заранее нанесенной метке.

Достоинствами данного процесса можно назвать:

- производительность, которая почти сравнима с производительностью фотолитографии;
- срок службы фотокатода выше, чем фотошаблона;
- высокую степень чистоты процесса (экспонирование в вакууме).

К недостаткам следует отнести:

- существенно меньшие точности совмещения (0,1–0,3 мкм) и меньшую разрешающую способность (0,3–0,5 мкм);
- сложность обеспечения совмещения;
- сложность и высокую стоимость процесса изготовления фотокатодов.

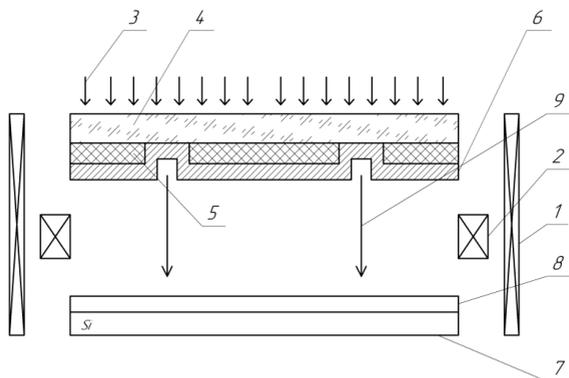


Рисунок 23 – Схематичное отображение процесса проекционной электронной литографии без масштабирования с применением фотокатода: 1 – отклоняющая система; 2 – фокусирующая система; 3 – УФ излучение; 4 – кварцевая основа фотокатода; 5 – диоксид титана, маскирующий УФ излучения слой; 6 – пленка палладия, обладающего большим фотовыходом электронов; 7 – подложка; 8 – электронорезист; 9 – поток электронов

Тем не менее, данный процесс из-за относительно высокой производительности и достаточно высокой точности, которую можно повысить рядом мероприятий можно рекомендовать для серийного и массового производства. Тем более, что для мелкосерийного и единичного изготавливать фотокатоды просто нерентабельно.

Проекционная электронная литография с уменьшением изображения осуществляется на полях – кадрах с размером в несколько миллиметров. Источником электронов может являться электронная пушка или фотокатод, аналогичный рассмотренному выше. В системах с электронной пушкой используются шаблоны из металлической фольги, которая экранирует коллимированный плоскопараллельный пучок электронов как это показано на рисунке 24. Процесс протекает в вакууме и практически аналогичен описанным выше.

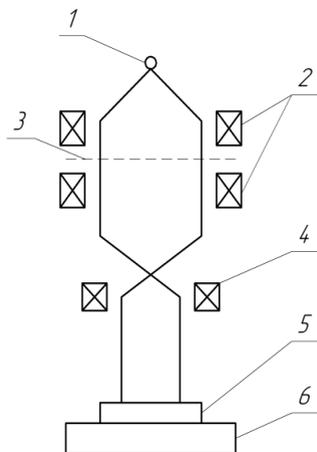


Рисунок 24 – Схематичное изображение установки электронной литографии, реализующей проекционную литографию с масштабированием: 1 – источник электронов; 2 – линзы конденсора; 3 – теневой шаблон из фольги; 4 – линза проекционная; 5 – подложка; 6 – координатный столик

Совмещение выполняется в режиме сканирования остросфокусированного луча аналогично сканирующей электронной литографии.

Достоинства проекционной электронной литографии с масштабированием:

- производительность несколько выше, чем у сканирующей, но ниже чем у проекционной без масштабирования;
- размер формируемых элементов от 0,25 мкм;
- высокая точность формирования рисунка.

Недостатки:

- при использовании фотошаблонов их дороговизна;
- при использовании электронной пушки – влияние фольгового шаблона на электронный пучок.

Тем не менее, хочу еще раз отметить существенное преимущество использования масштабирования рисунка. Изготавливая любой шаблон мы выполняем заданные размеры с определенной точностью, например ± 1 мкм. При масштабировании 10:1 допуск на размер соответственно уменьшается до $\pm 0,1$ мкм. Таким образом мы добиваемся более высокой точности передачи рисунка. Данный вид литографического процесса занимает среднее положение между сканирующей и проекционной без масштабирования с точки зрения применимости в производстве.

4.6.2. Рентгеновская литография

Интерес к рентгеновской литографии вызван тем, что она позволяет при сохранении производительности фотолитографии, значительно повысить разрешающую способность.

Экспонирование производится характеристическим излучением с $\lambda = 0,4...5$ нм. Его получают при взаимодействии ускоренных электронов с электронами внутренних оболочек атомов облучаемого вещества.

В качестве резистов используют электронорезисты в силу того, что процесс взаимодействия характеристического рентгеновского излучения с веществом практически тот же, что и при облучении электронами.

Источниками рентгеновского излучения служат металлические мишени, облучаемые потоками электронов с энергиями 10–20 кэВ (длина волны зависит от облучаемого материала, от минимального в сторону увеличения Pd, Ro, Mo, и т.д.).

Технология изготовления рентгеношаблонов – представляет сложную проблему. Сначала формируют слоеный пирог типа того, что изображен на рисунке 25.

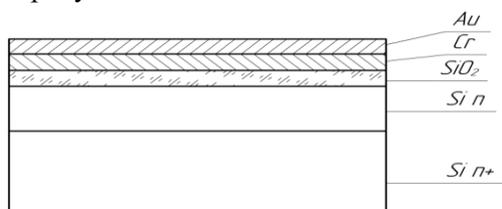


Рисунок 25 – Заготовка для изготовления шаблона при рентгеновской литографии

На сильно легированной подложке n^+ кремния эпитаксиально выращивают слаболегированный слой n толщиной порядка 3 мкм. Поверх данного слоя формируют окислением в влажном кислороде слой SiO_2 и затем наносят методом осаждения в вакууме тонкие слои хрома Cr и золота Au. В этом пироге формируют рисунок, протравливая металлические слои до слоя SiO_2 , а затем окна (под сформированным рисунком) в сильнолегированной подложке кремния, которая препятствует проникновению рентгеновского излучения как это показано на рисунке 26.

Сильно легированный Si служит механической основой для формируемого шаблона (обеспечивает жесткость). Рисунок фор-

мируется непрозрачными для рентгеновского излучения участками металлической пленки и прозрачными слоями SiO_2 .

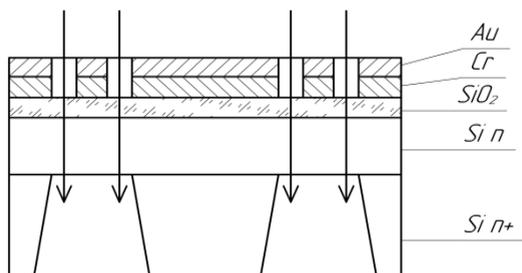


Рисунок 26 – Путь проникновения рентгеновских лучей через сформированный шаблон

Для формирования рисунка в металлических слоях следует использовать электронную или ионную литографию, как обеспечивающие наибольшую точность передачи рисунка. Экспонирование производится только теневым способом с масштабом 1:1 (так как линзы для фокусировки рентгеновского излучения пока не изобрели), следовательно, экспонирование производится в расходящемся пучке излучения, что служит причиной дисторсии, то есть искажения геометрии рисунка (это основной недостаток способа). Схематичное изображение процесса рентгеновской литографии в установке отобразено на рисунке 27.

Гелий в отличие от воздуха практически не поглощает рентгеновское излучение. Совмещение выполняется путем регистрации проходящего рентгеновского излучения (РИ). Чем меньше толщина слоя вещества, тем интенсивнее излучение. Следовательно, метка представляет собой локальное утоньшение подложки, которое позволяет достаточно точно совместить сформированную структуру с рисунком шаблона.

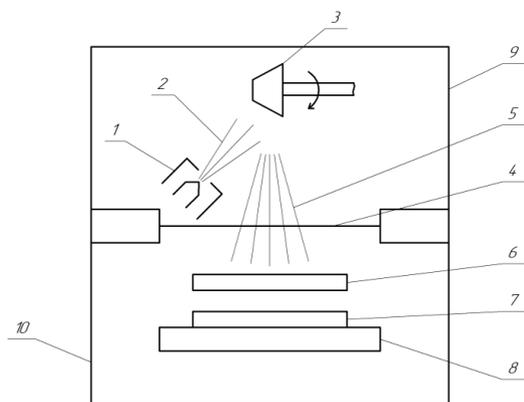


Рисунок 27 – Схематичное изображение установки рентгеновской литографии: 1 – электронная пушка; 2 – поток электронов; 3 – мишень, представляющая собой металл определенного вида; 4 – бериллиевое окно (бериллий прозрачен для рентгеновского излучения); 5 – формируемые рентгеновские лучи; 6 – рентгеношаблон; 7 – подложка с электронорезистом; 8 – координатный столик, позволяющий осуществлять совмещение; 9 – вакуумная камера для формирования рентгеновского излучения; 10 – камера экспонирования (рекомендуется заполнять гелием)

Достоинства рентгеновской литографии:

- малая длина волны, следовательно, малая дифракция, следовательно, малые геометрические размеры элемента;
- малая энергия излучения, следовательно, малое рассеивание по глубине, следовательно, толщина резиста практически не оказывает влияния;
- пыль, как правило, прозрачна для РИ и, следовательно, не оказывает влияния на процесс (снижаются требования к чистоте помещений);
- РИ не чувствительно к электрическому заряду подложки.

Недостатки:

- сложность изготовления рентгеношаблонов;
- малая чувствительность резистов (это можно трактовать как недостаток увеличивающий время работы так и достоинство, повышающее точность);
- экспонирование с длиной волны более 1 нм рекомендуется проводить в вакууме;
- субмикронные размеры достигаются только при пошаговом экспонировании из-за чувствительности к стабильности плоскостности поверхностей и геометрическим размерам шаблонов.

В целом рентгенолитография, несмотря на ее привлекательность, остается достаточно экзотическим методом передачи рисунка с шаблона на материал ИМС.

4.6.3. Ионно-лучевая литография

Появилась как средство, позволяющее изжить недостатки методов электронной и рентгеновской литографий. В отличие от электролитографии:

- ионы, обладающие большой массой, меньше подвержены рассеянию в слое резиста;
- возбуждаемые вторичные электроны обладают малой энергией;
- в ионном луче значительно меньше взаимного отталкивания;
- ионы не подвержены дифракции.

В отличие от рентгенолитографии:

- ионы позволяют получать коллимированные параллельные пучки, что исключает геометрические эффекты (облучение расходящимся лучом).

Сканирующая ионно-лучевая литография аналогична сканирующей электролитографии. Применяются ионы He, H, Ar образующиеся в источниках аналогичных применяемых в ионно-лучевом травлении (см. рисунок 14, с. 62). Сканирование выполняется кад-

рами с площадью 1 мм^2 (что еще меньше чем при сканировании электронным лучом). Размеры элементов теоретически составляют порядка $0,01...0,3 \text{ мкм}$.

Проекционная ионно-лучевая литография выполняется широкими коллимированными пучками площадью 1 кв. см (совмещение выполняется в режиме сканирования с помощью заранее нанесенных металлических меток). Шаблоны по своей структуре схожи с шаблонами рентгенолитографии, в качестве прозрачного для ионов материала используются сверхтонкие слои ($70...200 \text{ нм}$) Al_2O_3 или Si ориентации (110) ($0,7...1 \text{ мкм}$). Непрозрачная часть выполняется из золота. Размеры элементов не хуже $0,5 \text{ мкм}$. Резисты для ионно-лучевой литографии аналогичны электронорезистам (они даже более чувствительны, так как размеры ионов больше и, следовательно, нарушение связей происходит эффективнее). Либо неорганические резисты на основе GeSe .

Ионная литография также как и электронолитография легко автоматизируется, однако как технический процесс она пока остается способом, редко применяемым в массовом производстве.

4.7. Методы получения полупроводниковых слоев и переходов

Один из таких методов мы рассмотрели ранее – это эпитаксия. Она может применяться для создания «резких» гетеропереходов, из одного и того же материала или из двух разных. Напомню, что с помощью эпитаксиального наращивания сейчас широко получают, не только слои полупроводниковых материалов, но и гетеропереходы с совершенной кристаллической решеткой. Однако для этих целей намного раньше появились и другие ТП.

4.7.1. Термическое диффузионное легирование [4]

Термическая диффузия может осуществляться по трем механизмам:

- обменный механизм с помощью простого замещения с участием двух атомов или кольцевой обмен с участием нескольких атомов;

- вакансионный механизм реализуется последовательным перескоком примесных атомов замещения из собственных узлов в вакантные;

- междоузельный механизм осуществляется путём последовательных переходов примеси из одного междоузлия в другое.

Для легирующих примесей в германии и кремнии наиболее вероятен вакансионный механизм. Количество вакансий зависит от температуры в соответствии с выражением

$$n_{\text{вак}} = n \cdot e^{-E/(k \cdot T)},$$

где n – количество атомов полупроводника в 1 см^3 ; E – энергия необходимая для образования вакансии; $k \cdot T$ – постоянная Больцмана и абсолютная температура (в $^{\circ}\text{K}$).

С увеличением температуры количество вакансий растёт и при $1000 \dots 1200^{\circ}\text{C}$ становится сравнимым с количеством атомов полупроводника в единице объема.

Вероятность перемещения атома примеси в вакантное место пропорциональна выражению

$$p \approx e^{-\Delta E/(k \cdot T)},$$

где ΔE – энергия активации процесса диффузии равна сумме энергий необходимых для образования вакансий и энергии перехода атома примеси. В кремнии $\Delta E = 5,5 \dots 4,3 \text{ эВ}$.

Параллельно с диффузией атомов примеси идёт процесс самодиффузии (то есть диффузии собственных атомов полупроводника). Однако благодаря сильным связям атомов в монокристалле полупроводника этот процесс незначителен.

Многие атомы 1, 2, 6, 7, 8 групп таблицы Менделеева в виде примеси занимают места в междоузлиях, то есть образуют твёрдые растворы внедрения. Этот процесс протекает легче в виду большей вероятности перемещения, следовательно, процесс диффузии по этому механизму протекает значительно быстрее. Однако для формирования определенного типа электропроводности необходимо, чтобы атом примеси, не просто проник в объем монокристалла полупроводника, но и встраивался в кристаллическую решетку, образуя связи с атомами полупроводника. Поэтому данные примеси для наших целей непригодны.

Растворимость примесей возрастает при росте температуры. Однако по достижении максимума растворимости начинает снижаться. Максимальной или предельной растворимостью примеси в полупроводнике называется максимально возможное количество примеси в единице объема данного полупроводника при данной температуре.

Процессы диффузии описываются законами Фика. Если рассматривать одномерный процесс в направлении нормали к поверхности пластины, то первое уравнение можно записать следующим образом:

$$F = -D \frac{dN}{dX},$$

где D – коэффициент диффузии, численно равный количеству атомов примеси, проходящих за единицу времени через единицу площади поверхности пластины при единичном градиенте концентрации примеси $\frac{dN}{dX} = 1$, знак минус показывает, что перемещение атомов происходит в направлении убывания концентрации.

Второе уравнение диффузии выводится из первого при допущении, что коэффициент диффузии не зависит от концентрации

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial X^2}.$$

Это уравнение определяет количество атомов примеси, вводимое в полупроводник в любой момент времени $\frac{\partial N}{\partial t}$ на любом расстоянии от поверхности ∂X^2 при заданной температуре, которая присутствует в выражении в неявном виде (через коэффициент диффузии)

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

где D_0 – коэффициент диффузии при бесконечно большой температуре; ΔE – энергия активации процесса диффузии данной примеси. Процессы диффузии в полупроводнике ведут при высоких температурах (800...900°C для германия и 1000...1200°C для кремния).

Распределение легирующей примеси по глубине диффузионного слоя $N = f(x)$, для конкретных условий находят путём частного решения второго уравнения. Для диффузии из бесконечного постоянного источника примеси

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}},$$

где N_0 – концентрация примеси на поверхности пластины; x – глубина диффузии; t – время процесса; erfc – условное обозначение функции дополнения интеграла ошибок до единицы. Обязательное условие: количество примеси, поступающее на поверхность равно количеству примеси уходящей с поверхности в объём пластины. Разумеется такой механизм реализовать практически не представляется возможным.

Для одномерной диффузии из ограниченного источника (например, из источника, созданного на поверхности пластины в окне контактной маски). Распределение примеси описывается уравнением Гаусса

$$N(t, x) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-x^2/4(Dt)},$$

где Q – общее количество примеси, введённое в полупроводник через 1 см^2 поверхности за время диффузии.

Особенностью обоих распределений примеси является равномерное убывание концентрации примеси от поверхности вглубь полупроводника.

Реальные распределения примесей отличаются от расчётных. Тем не менее, несмотря на невысокую точность расчетных параметров, на практике пользуются законами Фика, так как других математических методов нет. Результаты расчета корректируют в соответствии с экспериментом, проведенным после математического моделирования.

Особенностью диффузии при изготовлении интегральных схем является то, что она проводится через окна в контактной маске, размеры которых сравнимы с глубиной диффузии и, следовательно, для описания необходимо использование трёхмерных уравнений Фика, то есть уравнений учитывающих движение примеси по трем координатам X , Y и Z .

При локальной диффузии примесь проникает в полупроводник не плоским, а искривлённым у края фронтом. Искривление фронта перехода влияет на параметры планарных структур. Плотность электрического тока по площади р-п перехода неравномерная и следовательно пробой возможен при более низких напряжениях. Площадь перехода возрастает, что приводит к росту ёмкости р-п перехода и изменению сопротивления диффузионного слоя, а также к возможности закорачивания близкорасположенных переходов выполненных в соседних окнах (последнее ограничивает степень интеграции ИМС).

Высокие температуры, при которых происходит диффузия, вносят ещё одно искажение параллельно с процессом диффузии идёт поверхностное термическое окислирование, следовательно, глубина полученного слоя значительно меньше расчётной (т. к. легирование через слой SiO_2 затруднено). Этот же процесс может приводить к аномальному распределению примеси, когда у поверхности концентрация примеси меньше чем на некоторой глубине, это снижает качество омических контактов. На практике термическую диффузию нередко совмещают с формированием контактной маски для следующей литографии, что следует учитывать при разработке ТП на конкретные изделия.

Для преодоления этих сложностей применяют так называемую двустадийную диффузию. На первой стадии, которая называется загонкой, в тонкий приповерхностный слой полупроводниковой пластины вводится из неограниченного источника определённое количество примеси. Тем самым создаётся поверхностный слой сильнолегированного полупроводника, который служит источником примеси на втором этапе легирования. Первая стадия проводится, как правило, быстро и при относительно низких температурах при этом образуется так называемое примесносилкатное стекло.

Вторую стадию называют диффузионным отжигом или разгонкой. Её совмещают с операцией термического окислирования в окисляющей среде. Диффузионный отжиг проводится при отсутствии внешнего источника примеси. Температура и время проведения больше чем при первой стадии. Растущая плёнка окисла поглощает поверхностные дефекты и препятствует уходу примеси из слоя, следовательно, можно считать, что идёт легирование из ограниченного источника по Гауссовскому распределению.

При этом Q -количество примеси в источнике на 1см^2 пластины определяют из условий легирования на первом этапе примерно так

$$Q = \int_0^{\infty} N(x) dx = 2N_0 \sqrt{Dt/\pi} \approx 1,13N_0 \sqrt{Dt},$$

где N_0 – поверхностная концентрация на первой стадии легирования.

Техника выполнения диффузионного легирования

Основным для легирования кремния является способ проточной трубы. Способ предъявляет жёсткие требования к чистоте подложки, примеси и оборудования. Легирование примесью одного типа осуществляется на установке, на которой никогда не проводится легирование другой примесью. Установку специально насыщают определённым типом примеси (для предотвращения обеднения газового потока).

Источники примеси – диффузаны твёрдые, газообразные и жидкие соединения, в состав которых входит легирующий элемент. Примеси в элементарном виде не применяют. Бор при T диффузии имеет слишком малое давление пара, фосфор – воспламеняется, мышьяк высокотоксичен.

Установка для термического легирования с отдельными твёрдыми источниками примеси выглядит, как показано на рисунке 28.

Испарение твёрдого источника примеси (например, B_2O_3 или P_2O_5) производится в низкотемпературной зоне 1000°C и $200\text{--}300^\circ\text{C}$ соответственно, а легирование в высокотемпературной зоне при $1000\text{--}1300^\circ\text{C}$. Нагрев идет индукционным путем. Кварцевый реактор продувают смесью газов N_2 и O_2 и после установления термического режима вводят в рабочую зону пластины кремния.

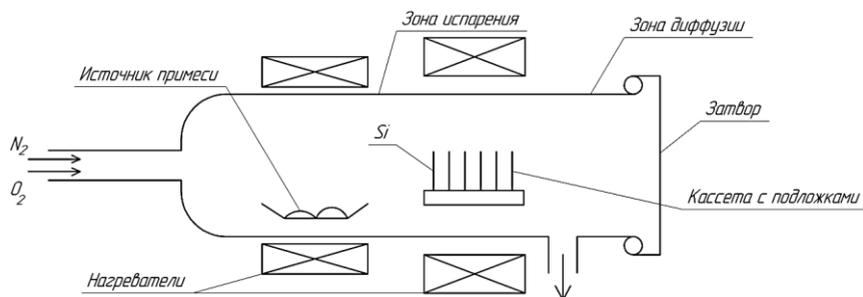
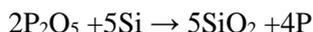
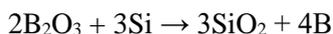


Рисунок 28 – Схематичное изображение двух зонной установки термического легирования, реализующей легирования из твердого источника примеси

Легирование ведут в присутствии кислорода для образования на поверхности кремния боросиликатного $n\text{B}_2\text{O}_3m\text{SiO}_2$ и фосфоросиликатного $n\text{P}_2\text{O}_5m\text{SiO}_2$ стекла (БСС и ФСС соответственно) на поверхности идут реакции с освобождением элементарной примеси.



Достоинствами данного технологического метода являются:

- давняя освоенность;
- относительная техническая простота.

Недостатками легирования из отдельных твёрдых источников являются:

- необходимость 2-х зонной установки;
- недостаточная воспроизводимость значений из-за изменения площади испарения источника примеси;
- трудно получить низкие поверхностные концентрации.

Практически аналогично процесс протекает при использовании диффузии из так называемых параллельных твёрдых источников. Они представляют собой пластины нитрида бора, метафосфа-

та алюминия, и так далее предварительно оксидированные и располагающиеся между пластинами кремния в зоне диффузии. При этом используют 1-о зонные печи. Поверхностные твёрдые источники – это главным образом сильнолегированные оксиды, полученные осаждением из ПГФ (парогазовой фазы) или также осажденные слои поликремния сильнолегированные.

В этом случае диффузию проводят в однозонных печах в инертной среде. Диффузия из поверхностных твёрдых слоёв позволяет получить более широкий диапазон значений поверхностных концентраций с малым разбросом.

Газообразные источники подаются из баллонов и перед входом в кварцевую трубку смешиваются с азотом и кислородом. В зоне реакции образуется оксид легирующего компонента, а на поверхности выделяется элементарная примесь. Основной недостаток газообразных источников их токсичность.

Жидкие источники применяют аналогично процессу эпитаксии из ПГФ при хлоридном методе (см. п. 4.4.2).

Основные переходы процесса диффузии при загонке:

1. Продувка реактора инертным газом.
2. Вывод реактора на предварительный температурный режим.
3. Загрузка кассеты с пластинами и предварительная выдержка для обезгаживания и установления термического равновесия.
4. Нагрев печи с кассетой до температуры диффузии.
5. Подача диффузанта и выдержка при температуре диффузии заданное время.
6. Прекращение подачи диффузанта кратковременная выдержка и охлаждение до предварительной температуры.
7. Выгрузка кассеты из реактора с естественным охлаждением до комнатной температуры.

Диффузионный отжиг (разгонка)

Выполняется либо в той же установке, что и первая стадия диффузии либо после удаления поверхностного слоя ФСС или БСС в обычной однозонной или конвейерной печи. Слой стекла удаляется вместе с толстой оксидной маской, так как он может служить источником примеси при разгонке. И, как уже говорилось ранее, при удалении толстой оксидной маски отжиг проводится в кислородной среде, что позволяет одновременно сформировать маскирующее покрытие для следующей диффузии.

Следует отметить, что для формирования основных элементов биполярных ИМС n-p-n транзисторов необходимо реализовать последовательно как минимум три диффузии примеси, что создает определенную проблему. Дело в том, что при термической диффузии мы нагреваем всю подложку до высоких температур. При этом ранее введенная в объем примесь не перестает диффундировать после завершения ее разгонки. Следовательно, цикл из трех или более термических диффузий следует строить с использованием примесей с разными коэффициентами диффузии (первой идет примесь с наименьшим коэффициентом, далее примесь с большим коэффициентом и так далее). Одновременно с этим следует проводить загонку и разгонку примесей при все более низкой температуре, что собственно определяется коэффициентами диффузии примесей. Нередко последнюю диффузию для формирования наименее глубоко залегающего эмиттерного слоя заменяют ионным легированием, что позволяет существенно повысить поверхностную плотность упаковки ИМС и улучшить параметры формируемых транзисторов, так как данный процесс протекает при относительно низких температурах, при которых диффузия примесей практически невозможна.

4.7.2. Ионное легирование [4]

Осуществляется в два этапа внедрение ионов и отжиг. Этап внедрения принципиально отличается от диффузии, так как внедрение происходит за счёт кинетической энергии ускоренных ионов примеси, а не градиента концентрации. Ионное внедрение быстрый процесс его можно производить при комнатной температуре и применять для легирования примеси с низкими коэффициентами диффузии или низкими растворимостями в твёрдой фазе. Его особенно удобно применять для легирования полупроводников с низкими температурами плавления (например, арсенида индия) или для полупроводников с очень высокими температурами легирования (например, карбида кремния). В зависимости от направления движения ионов внедрение может происходить по двум механизмам, приводящим к различной глубине проникновения и распределению примеси.

1. Ориентированное внедрение. Когда угол падения ионов на пластину кремния меньше критического. Ионы движутся по межатомарным каналам. Глубина внедрения максимальна при легировании кристалла с поверхностным индексом (110) и уменьшается по ряду критических ориентаций (110) (100) (111) увеличивая плотность распределения атомов в плоскости перпендикулярной внедрению.

2. Разориентированное внедрение при угле падения больше критического. При этом ионы интенсивно сталкиваются с атомами полупроводника, что приводит к хаотическому рассеиванию на узлах кристаллической решетки. При этом ионы быстро теряют свою энергию, отдавая её атомам решетки полупроводника и смещая их из своих узлов.

Чем больше энергия ионов, тем более интенсивно смещение. Критическая доза ионного облучения, при которой полупроводник

переходит из кристаллического состояния в аморфное называется дозой аморфизации. Распределение ионов примеси при разориентированном внедрении описывается законом Гаусса (так как столкновения носят вероятностный характер)

$$N(x) = \left(\frac{Q}{\Delta R_{II} \cdot \sqrt{2\pi}} \right) \cdot e^{-\frac{(x - \bar{R}_{II})^2}{2\Delta R_{II}^2}},$$

где Q – доза облучения, см⁻²; \bar{R}_{II} – среднеквадратичное отклонение нормальных пробегов (т. е. проекций пути ионов на направление начального внедрения (пояснить рисунком)), см; x – глубина внедрения ионов, см.

Значения R_{II} и ΔR_{II} для ионов различных энергий табулированы, определяются экспериментально.

Максимум распределения ионов примеси приходится на расстоянии от поверхности подложки равном среднему нормальному пробегу ионов. Увеличение энергии приводит к заглублению легированного слоя, что позволяет получить скрытые легированные слои. Отжиг после ионного внедрения необходим для восстановления нарушенной радиацией кристаллической решетки полупроводника и перевода ионов в электрически активное состояние (встраивание в кристаллическую решетку полупроводника, образование связей и определенного типа электропроводности). За 10...20 минут при температурах до 700°C смещённые атомы полупроводника и внедрённые ионы приобретают достаточную подвижность и переходят в вакантные узлы решётки. Происходит упорядочивание структуры полупроводника и достигается цель легирования. На практике кривые распределения примеси значительно отличаются от расчётных за счёт наличия шлейфа с увеличением энергии максимум сглаживается (рисунок 29).

Причинами этого явления является диффузия, которая велика даже при низких температурах за счёт разупорядочивания структуры после ионного внедрения.

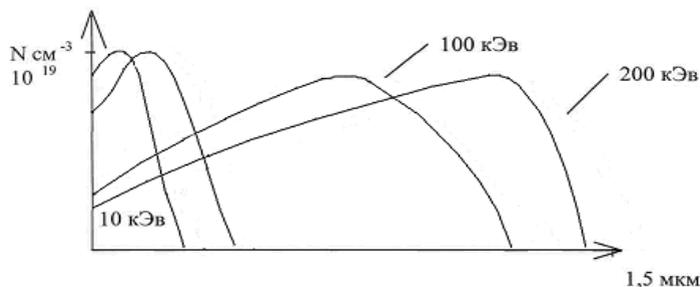


Рисунок 29 – Примерные кривые распределения примеси при ионном легировании

Отжиг также приводит к изменению профиля легирования и тем больше чем выше температура.

Техника выполнения ионного легирования

Ионное внедрение проводят в вакуумных установках дифференциальной откачки, в которых степень вакуума повышается по мере движения ионов от источника к пластинам это установки серии «Везувий» и других.

Для получения ионов основных легирующих примесей используют чистые элементарные P, As, Sb и соединения BF_3 , VBr_3 , BCl_3 , PCl_3 и так далее.

В ионном пучке присутствуют ионы различных веществ для отсеивания ненужных используют устройство под названием масс-сепаратор. Отклонение ионов при движении в постоянном магнитном поле от прямолинейной траектории зависит от массы иона и его заряда. Для внедрения используют широкий или остросфокусированный пучки ионов. При внедрении остро фокусированным

лучом ионов необходимо сканирование по поверхности подложки. Этот способ позволяет осуществить локальное легирование со сложными профилями. При использовании широкофокусного пучка необходимо формировать маски на поверхности пластины из SiO_2 ; Si_3N_4 ; W; Mo; Au и др. Толщины масок от 0,1 до 2 мкм в зависимости от плотности маскирующего материала. Чем толще маска, тем выше разрешающая способность данного процесса, поэтому часто прибегают к использованию более плотных металлических масок, которые к тому же точнее передают рисунок при литографии.

Достоинства ионного легирования:

- высокая точность и воспроизводимость глубины и степени легирования за счет поддержания параметров ионного пучка;
- возможность создания практически любого профиля легирования;
- возможность получения скрытых областей легирования;
- точность воспроизведения рисунка при локальном легировании;
- высокая производительность и автоматизируемость процесса;
- возможность совмещения с другими вакуумными процессами.

Недостатки и ограничения:

- необходимость отжига (хотя и более низкотемпературного, чем при термическом легировании);
- сложность воспроизводимого легирования слоев толщиной более 1 мкм;
- сложность однородного легирования пластин большого диаметра из-за расфокусировки луча при больших отклонениях (легирование кадрами как при ионной литографии (см. п. 4.6.3.));
- сложность и высокая стоимость оборудования.

Ионное внедрение – довольно универсальный технологический процесс. Его используют также при реализации ряда других технологических операций. Перечислим их.

1. Термическая диффузия из слоев, полученных ионным легированием (слой с ионным легированием используется в качестве аналога операции загонки). Увеличивается точность определения количества примеси в локальном конечном источнике.

2. Диффузия из поликремния (он используется в качестве материала, содержащего примесь).

3. Радиационно-стимулированная диффузия (материал с радиационными дефектами легче подвергнуть термическому легированию при низких температурах).

4. Получение пленок оксидов и нитридов с хорошими диэлектрическими свойствами при внедрении ионов O_2 и N_2 с последующим отжигом при температурах порядка $500-600^\circ C$ и так далее.

5. МЕТОДЫ ИЗОЛЯЦИИ БИПОЛЯРНЫХ СТРУКТУР В ИМС

Все элементы в полупроводниковых ИМС выполняются в приповерхностном слое и на поверхности полупроводниковой подложки – кристалла. Она, как правило, представляет собой пластину кремния толщиной 200–300 мкм и площадью от 1,5×1,5 до 6×6 мм (за исключением СБИМС).

Полупроводниковые ИМС имеют значительно более высокую степень интеграции и большую надежность по сравнению с пленочными и гибридными ИМС, однако есть и недостатки:

- худшее качество пассивных элементов;
- необходимость изоляции элементов ИМС.

Последнее очень важно, так как, поскольку все элементы выполнены в едином технологическом цикле и в одном кристалле, то они, как правило, сильно связаны между собой, что приводит к формированию не только паразитных связей – емкостных и резистивных, но и даже паразитных активных элементов.

Например, биполярный планарно-эпитаксиальный транзистор n-p-n – типа (рисунок 30).

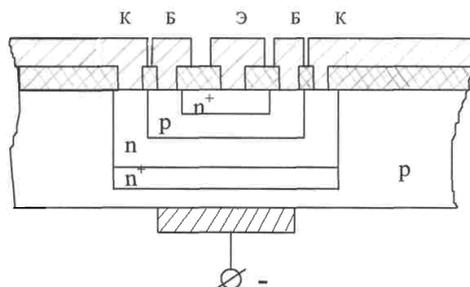


Рисунок 30 – Упрощенное изображение разреза биполярного n-p-n транзистора с изоляцией обратносмещенным p-n переходом

Его эквивалентная схема, даже неполная, выглядит, как показано на рисунке 31. Для того, чтобы уменьшить паразитные связи, необходимо использовать изоляцию. Имеется 4 основных способа. Первый способ наиболее распространенный, универсальный и простой – это изоляция обратносмещенным р-п – переходом. При этом в объеме кристалла формируются карманы другого типа проводимости, в которых затем уже формируются сами элементы.

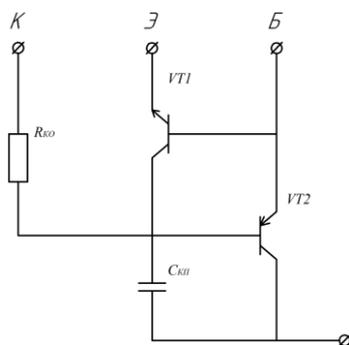


Рисунок 31 – Упрощенная эквивалентная схема n-p-n транзистора в полупроводниковой подложке

Как видите, образуется р-п – переход, смещенный в обратном направлении то есть запертый (рисунок 32). Для этого на кристалл необходимо подать смещающее напряжение противоположной полярности сформированных областей. Если кристалл у нас р типа, то формируются области n типа и на кристалл подается отрицательное смещение.

Два существенных недостатка:

- необходимость подачи постоянного смещающего напряжения на кристалл;
- значительная паразитная емкостная связь между карманами и, следовательно, между элементами.

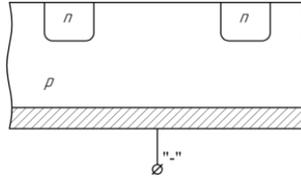


Рисунок 32 – Схема изоляции обратного смещенным р-п переходом

Второй способ наиболее эффективный – изоляция карманов слоем окисла (диэлектрика) приведена на рисунке 33.

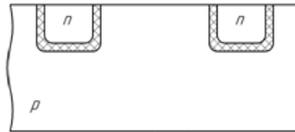


Рисунок 33 – Схема изоляции слоем диэлектрика

При этом емкостная связь значительно меньше, так как толщина слоя окисла больше толщины р-п – перехода. Недостаток – значительное усложнение технологии изготовления. Собственно говоря, это наиболее затратный и нетехнологичный способ изоляции биполярных ИМС из всех возможных.

Третий способ – изготовление ИМС по КНС – технологии (рисунок 34), когда на подложку искусственного лейкосапфира наращивают слой кремния, а затем формируют островки, в которых изготавливают отдельные элементы. Недостаток – сложность межэлементной металлизации (разноуровневое расположение контактов). Дело в том, что каждая точка перегиба тонкой металлической пленки – это точка потенциального отказа при эксплуатации сформированных структур. Увеличение плотности тока приводит к увеличению градиентов температур, а значит к отказу (например, по причине электродиффузии).

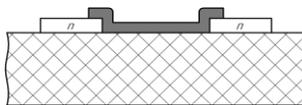


Рисунок 34 – Схема изоляции по КНС технологии

Четвертый способ – комбинированный, который принято называть изопланарной технологией, когда дно областей, в которых формируются элементы (карманов), изолировано обратным смещением р-п перехода, а бока – диэлектриком типа SiO_2 (рисунок 35).

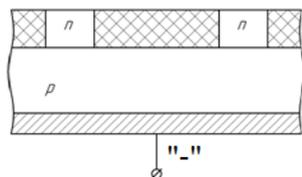


Рисунок 35 – Схема комбинированной изоляции по изопланарной технологии

Каждый из способов изоляции хорош, так или иначе. Но конкретный выбор способа зависит от очень многих условий. В первую очередь от условий эксплуатации ИМС. Например, изоляция обратносмещенным р-п переходом наиболее дешевая, но и наименее качественная. Полная диэлектрическая изоляция – наиболее качественная, но и очень дорогая в производстве. Комбинированная изоляция представляет собой усредненное решение между качеством и стоимостью. Она существенно дороже изоляции обратносмещенным р-п переходом, но обеспечивает лучшую изоляцию при меньшей стоимости процесса.

6. ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАРШРУТЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭКБ

В настоящее время доминирующим материалом электроники является кремний. В качестве маскирующих материалов выступают SiO_2 при легировании бором и нитрид кремния при легировании Al, Zn и Ga, так как они имеют больший коэффициент диффузии в пленке SiO_2 . Из донорных примесей чаще всего используют фосфор, так как по параметрам диффузии он предпочтительнее мышьяка и сурьмы. Доноры в кремнии, как правило, диффундируют медленнее и лучше растворяются, чем акцепторы, поэтому кремниевые транзисторы n-p-n типа более распространены, чем транзисторы p-n-p типа. Кроме того, подвижность электронов, как основных носителей заряда выше, чем дырок. Поэтому быстродействие электроники, построенной на транзисторах n-p-n типа выше. Более того, подавляющее большинство элементов схемы электрической принципиальной ИМС может быть выполнено на основе структур биполярных транзисторов. Например, в качестве емкостей можно использовать обратносмещенные p-n переходы любого транзистора, а в качестве резисторов (не слишком большого номинала) используют разнолегированные области тех же транзисторов или, в крайнем случае, резисторы в виде МДП структур с двумя выводами. Конденсаторы тоже могут выполняться в виде МДП структур, если их номинальная емкость не укладывается в емкости p-n переходов формируемых транзисторов. Поэтому любой типовой технологический процесс представляет собой процесс формирования основного элемента биполярных ИМС – n-p-n транзистора. Все остальные элементы формируются как следствие этого процесса за счет межэлементной коммутации. В дальнейшем мы сосредоточим внимание именно на формировании n-p-n транзисторов.

6.1. Примеры типовых технологических маршрутов биполярных ИМС с изоляцией обратносмещенным р-п переходом [4]

Как уже говорилось ранее, данный вид изоляции весьма распространен в силу ряда причин:

- поскольку он полностью совместим с полупроводниковой технологией ИМС, то он самый простой и дешевый;
- для микросхем с не слишком высокой эксплуатационной частотой и не критичных к поверхностной плотности упаковки данная изоляция вполне приемлема;
- данная схема изоляции значительно дешевле, чем полная диэлектрическая изоляция и комбинированная изоляция.

Приведем несколько примеров маршрутных ТП, применяемых достаточно часто для изготовления ИМС малой степени интеграции с относительно небольшой рабочей частотой и, как правило, бытового применения.

6.1.1. Разделительная диффузия насквозь эпитаксиального п-слоя

Для иллюстрации маршрута технологического процесса мы будем пользоваться рисунками разреза основного элемента ИМС биполярного п-р-п – транзистора. Однако не следует забывать, что одновременно или, как говорят, в едином технологическом цикле в ИМС формируются резисторы, емкости, диоды и так далее.

При использовании данного метода изготовление производится в два основных этапа. Первый – это изготовление эпитаксиальной структуры со скрытыми p^+ областями (рисунок 36). Второй этап – изготовление биполярной ИМС на этой структуре (рисунок 37).

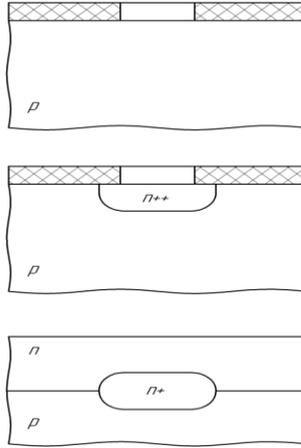


Рисунок 36 – Упрощенная схема изготовления эпитаксиальной структуры со скрытыми n^+ областями

Предположим, что исходным материалом является монокристаллическая подложка кремния p типа. В полном соответствии со стандартной планарной технологией мы на ее поверхности изготавливаем контактную маску (в данном случае вполне подойдет комбинированное термическое оксидирование с последующей литографией для формирования локальных окон под диффузию примеси). Далее проводим термическую диффузию донорной примеси, причем в качестве примеси в данной операции выступает, как правило, сурьма Sb , так как она обладает низким коэффициентом диффузии и относительно плохой растворимостью в кремнии. Толщина такого легированного слоя составляет обычно 2–5 мкм. Затем после удаления контактной маски и сухого травления поверхности уже в реакторе ГФЭ (см. п. 4.4.2.) производится эпитаксиальное наращивание слоя слаболегированного кремния n типа толщиной 3–35 мкм в зависимости от параметров, формируемых в данном слое транзисторов. При этом в процессе роста часть ранее введенной примеси проникает в растущий слой, как показано на

рисунке 36. Распределение примеси в эпитаксиальном слое равномерное, регулировка распределения на практике не производится. Уровень легирования 10^{15} - 10^{18} см⁻³.

Далее следует этап разделительной диффузии (рисунок 37) акцепторной примеси по бокам скрытой n^+ области для выделения изолирующего p n^+ кармана, который в будущем транзисторе будет играть роль коллекторной области. При этом используется та же последовательность стандартной планарной технологии (оксидирование, литография, диффузия). В качестве примеси чаще всего применяется бор В.

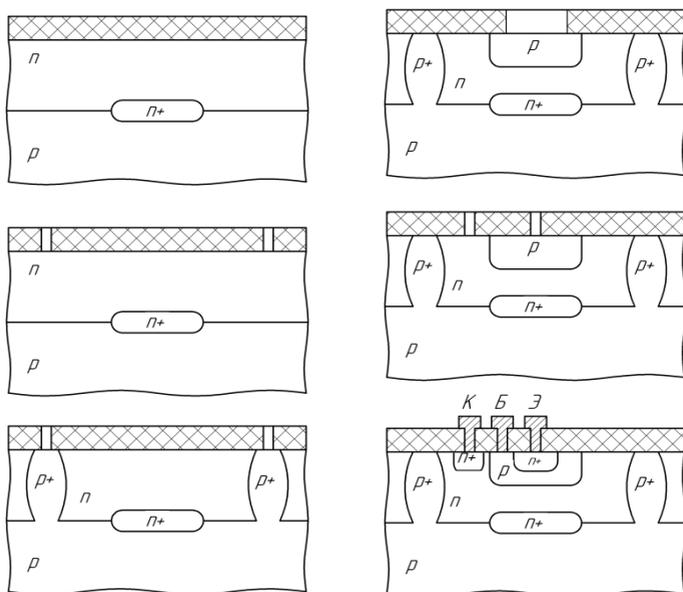


Рисунок 37 – Упрощенная схема формирования биполярного транзистора методом разделительной диффузии насквозь эпитаксиального n слоя

Отдельно приходится формировать базовую область, так как глубина диффузии примеси существенно меньше, чем при разде-

лительной диффузии и, следовательно, меньше время проведения операции. Производится она практически, так же как и предыдущая, но требует уже другой контактной маски. При этом распределение примеси в базовой области неравномерное согласно рассмотренным ранее закономерностям. Это приводит к возникновению ускоряющего внутреннего электрического поля в базе, что повышает рабочую частоту биполярного транзистора (то есть мы формируем так называемый дрейфовый транзистор).

Последняя диффузия примеси производится для формирования эмиттерных областей транзистора и приконтактных областей n^+ коллектора, которые необходимы для предотвращения обеднения основными носителями заряда полупроводника n типа в коллекторе в области контакта металл – полупроводник и образования диода Шоттки.

Для формирования этих областей используют фосфор P , образуя n^+ области с повышенным содержанием примеси (для усиления инжекции носителей заряда из области эмиттера). После проведения диффузии производится удаление контактной маски и выращивание диэлектрического слоя, который уже играет роль изоляции, а не маски.

Далее следует вскрытие контактных окон и формирование межэлементной коммутации, о которой более подробно мы поговорим в соответствующем разделе.

Достоинства данного метода:

- по сути это практически чисто планарная технология, а, следовательно, давно и хорошо освоенная;
- он позволяет применять простую термическую диффузию со стандартным набором примесей Sb , B , As , P .

Однако недостатки его также велики:

- большая площадь p - n переходов, а значит и ограниченная рабочая частота;

- относительно невысокие пробивные напряжения (особенно у изолирующего р-n перехода);
- целых пять литографий, если считать вместе с литографией по слою металла при формировании межэлементной коммутации (процесс довольно дорогостоящий);
- сильная емкостная связь между соседними элементами;
- наличие паразитных транзисторов р-n-р между базой и изолирующим р⁺ слоем.

Эти недостатки ограничивают область применения данного технологического метода. Тем не менее, его используют для изготовления ИМС 1-й и 2-й степени интеграции, рассчитанных на небольшие напряжения и относительно невысокую рабочую частоту. Увеличение степени интеграции при использовании данным методом невозможно.

6.1.2. Коллекторная изолирующая диффузия

Исходной структурой является структура со скрытой n⁺ областью, почти аналогичная рассмотренной выше. Отличие в том, что эпитаксиальное наращивание кремния осуществляется с легированием акцепторной примесью, например, бором В (рисунок 38).

Изолирующие карманы и одновременно коллекторные n⁺ n⁺⁺ области формируются в процессе диффузии донорной примеси сквозь тонкий (1–2 мкм) эпитаксиальный слой кремния электропроводности р типа.

Формируемые сквозь маску SiO₂ (не показана) области n⁺⁺ должны перекрывать скрытый n⁺ слой, формируемый, так как показано в предыдущем параграфе.

Базовая р⁺ диффузия проводится без маски, что исключает необходимость литографии. Слой повышенной концентрации акцепторной примеси р⁺ в верхней части базы толщиной 0,3–0,5 мкм предотвращает инверсию р-Si за счет положительного заряда SiO₂.

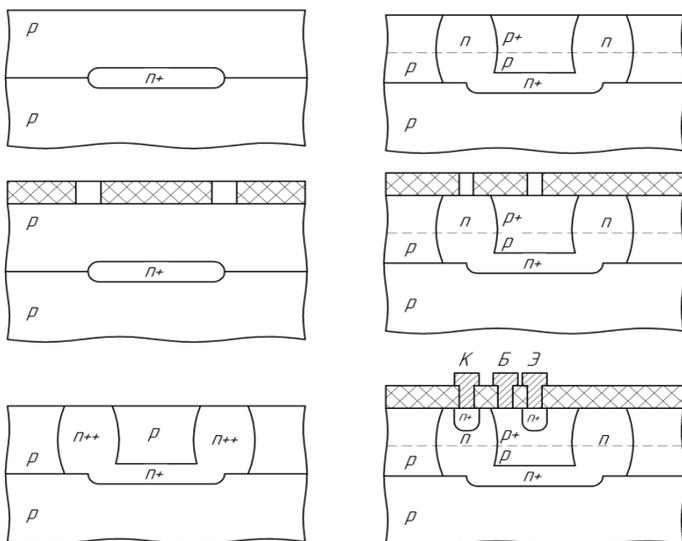


Рисунок 38 – Упрощенная схема формирования биполярного транзистора методом коллекторной изолирующей диффузии

Достоинства данного метода:

- снижается количество потребных литографий (четыре, включая литографию по слою металла);
- снижение требований к обратному напряжению изолирующего р-п перехода;
- повышение степени интеграции в силу снижения требований к формированию изолирующего р-п перехода.

Недостатки данного метода:

- низкое напряжение пробоя в база – коллекторном р-п переходе;
- пониженный дрейф носителей заряда через эпитаксиальную базу (даже при дополнительном легировании), что снижает частотные характеристики транзисторов.

Кроме рассмотренных методов можно привести ряд других, которые отличаются только структурой формируемого транзистора. Наиболее интересными являются методы базовой изолирующей диффузии (БИД), метод 3-х фотошаблонов, и самоизоляции с помощью n-полости. Все они отличаются простотой технологии, меньшей площадью, занимаемой одним элементом, и применяются при изготовлении маломощных ИМС с умеренным быстродействием. Кстати говоря, все эти методы относятся к комбинированным эпитаксиально-планарным методам. То есть стандартная планарная технология была в данном случае усовершенствована автоэпитаксией кремния на кремниевой подложке. Однако это не позволило перейти к СБИМС, поскольку изоляция обратномощенным р-п переходом не позволяет расположить формируемые элементы ИМС как можно более плотно в приповерхностной области полупроводникового кристалла. Гораздо более совершенной (но и несравнимо более дорогой) изоляцией является полная диэлектрическая изоляция, которую мы рассмотрим в следующем пункте.

6.2. Примеры типовых технологических маршрутов биполярных ИМС с полной диэлектрической изоляцией

Полная диэлектрическая изоляция может быть реализована несколькими способами:

- кремний в поликристаллической кремниевой подложке;
- кремний в диэлектрике (КВД);
- декаль технология;
- и так далее.

Каждый из этих способов обладает как своими достоинствами, так и недостатками. Но в целом о данном способе можно сказать, что качество такой изоляции очень высоко (из-за этого ее очень ценят при изготовлении ИМС военного и специального

применения). Данная изоляция повышает живучесть ИМС при экстремальных условиях эксплуатации, например, при эксплуатации в условиях повышенной радиации. Однако изготовление ИМС по технологиям полной диэлектрической изоляции гораздо дороже и характеризуется малым процентом выхода годных изделий.

6.2.1. Кремний в поликристаллической кремниевой подложке

Исходной заготовкой является однослойная n n^+ эпитаксиальная структура как показано на рисунке 39.

В полном соответствии с планарной технологией начинаем с формирования маски, которая позволит провести глубокое локальное травление с целью выделения $n - n^+$ кармана. Затем полученные мезы покрываем слоем диэлектрической изоляции (это может быть просто слой SiO_2 или комбинация из двух слоев $SiO_2 + Si_3N_4$ толщиной 1–2 мкм). Перед нанесением диэлектрической изоляции маска, через которую проводилось глубокое локальное травление, удаляется.

Поверх сформированной изоляции осаждаем слой высокоомного поликремния толщиной 175...200 мкм. Этот слой в дальнейшем будет выполнять чисто конструкционную функцию, то есть обеспечивать механическую прочность конструкции и служить основой для ИМС. Его электрические характеристики нас не интересуют, за исключением как можно меньшей электропроводности (около 50 Ом/см).

Остаток от первоначальной подложки сошлифовывается до выделения $n - n^+$ карманов (примерно по пунктирной линии на рисунке 39). Эти монокристаллические карманы – это все что осталось от первоначальной подложки. Они служат коллекторными областями n - p - n транзисторов, которые формируются в дальнейшем уже по чисто планарной технологии.

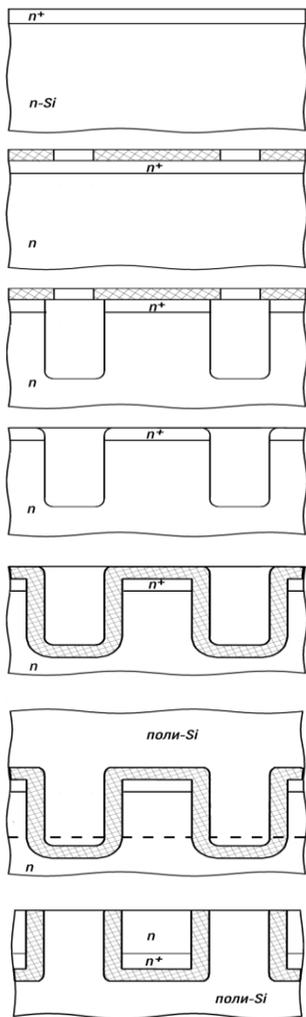


Рисунок 39 – Упрощенная схема изготовления ИМС с полной диэлектрической изоляцией в поликремнии

Следовательно, в целом процесс характеризуется как меза – эпитаксиально-планарный. Наряду с приведенным типовым маршрутом имеются его модификации. Например, для формирования комплементарных биполярных ИМС содержащих р-п-р и п-р-п структуры. А вместо поликремния нередко используется осаждаемый из парогазовой фазы диэлектрик типа ситалла, тогда технология носит название КВД (кремний в диэлектрике).

Как уже говорилось ранее, данный ТП обладает массой достоинств:

- качественная полностью диэлектрическая изоляция с малой емкостной связью;
- сохранение качества активных элементов, так как они выполняются в монокристаллическом полупроводнике;
- высокая надежность таких ИМС в целом.

Но и недостатков у данной технологии тоже не мало:

- процесс довольно сложен и трудоемок (особую сложность представляет прецизионная механическая обработка (шлифование));
- невысокая степень интеграции, так как выделенные карманы занимают довольно большую площадь;
- затрудненный теплоотвод от высоконагруженных элементов схемы (особенно для варианта КВД);
- транзисторы, выполненные по чисто планарной технологии, обладают всеми недостатками присущими данной базовой технологии;
- относительно небольшой процент выхода годных, что существенно повышает стоимость конечного изделия.

6.2.2. Декаль-технология

Существует два варианта полной диэлектрической изоляции с использованием так называемых воздушных зазоров – это КНС

технология, которая применяется в основном для изготовления МОП ИМС и КНД технология (кремний на диэлектрике), одним из вариантов которой является декаль-метод.

Он получил свое название от слова "декалькомания" – нанесение картинок с бумаги на какую-либо поверхность (переводные картинки).

Исходной является монокристаллическая подложка сильно легированного (n^+) кремния, на которой эпитаксиально выращивают слой относительно слабо легированного (n) кремния. В эпитаксиальном слое формируют неизолированные друг от друга элементы и выполняют межэлементную коммутацию, как и при изготовлении обычной ИМС.

После чего эту пластину приклеивают жидким стеклом к диэлектрической подложке. Большую часть первоначальной подложки сошлифовывают, оставляя только тонкий n^+ слой, выполняющий роль скрытого n^+ слоя в коллекторе. На этом слое формируется контактная маска, через которую осуществляется глубокое локальное травление вплоть до слоя изолирующего диэлектрика с нанесенной на него межэлементной коммутацией. Получается КНД структура как показано на рисунке 40.

Как и предыдущий ТП декаль-технологии следует отнести к комбинированному меза-эпитаксиально-планарным.

Достоинством этого метода является отсутствие высокотемпературных обработок при формировании изоляции.

Недостатки:

- необходимость прецизионной шлифовки;
- точное совмещение фотошаблона с обратной стороной структуры при травлении;
- сложное глубокое локальное травление.

В целом этот процесс можно охарактеризовать как более дешевый и более надежный с точки зрения процента выхода годных

изделий, чем предыдущий. Однако для него характерны те же достоинства и недостатки полной диэлектрической изоляции. Качество изоляции очень высокое, но степень интеграции мала, теплоотвод затруднен, параметры транзисторов ограничены, а трудоемкость изготовления ИМС и сложность технологии очень высоки.

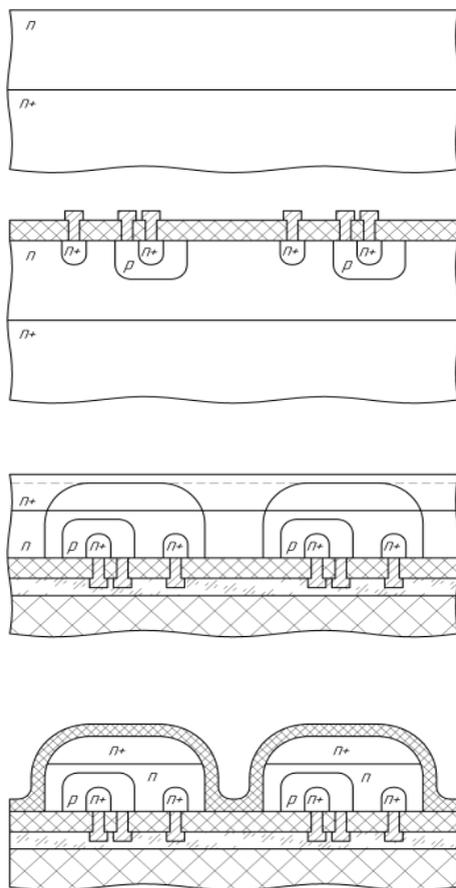


Рисунок 40 – Упрощенная схема формирования ИМС с изоляцией воздушными зазорами по декаль-технологии

Поэтому важно найти компромиссное решение, которое позволит снизить стоимость ТП и существенно повысить параметры активных элементов схемы. Таким компромиссным решением могут служить ИМС с комбинированной изоляцией.

6.3. Примеры типовых технологических маршрутов биполярных ИМС с комбинированной изоляцией

Комбинированная изоляция может быть, так же как и предыдущие виды изоляции, реализована большим количеством способов:

- изопланар 1;
- изопланар 2;
- полипланар;
- эпипланар;
- и другие.

Каждый из этих способов как всегда обладает достоинствами и недостатками, присущими конкретному способу. Но в целом о них можно сказать, что качество такой изоляции существенно выше, чем при использовании обратносмещенного р-п перехода (снижается емкостная связь и токи утечки). Однако изготовление ИМС по технологиям комбинированной изоляции дороже, поэтому ее применение целесообразно только для ИМС с высокой степенью интеграции. Критичных к предельной эксплуатационной частоте.

6.3.1. Процесс изопланар 1

Исторически первым (и далеко не самым лучшим) ТП использующим комбинированную изоляцию стал процесс изопланар 1, который представлен на рисунке 41.

Как вы можете видеть, в представлении технологических процессов мы уже не расписываем подробно всю последовательность

действий, опуская ранее описанные элементы технологии. Например, в данном конкретном случае используется подложка р типа с эпитаксиально выращенным слоем п типа и скрытым p^+ слоем. Эта структура полностью аналогична той, что описана в п. 6.1.1.

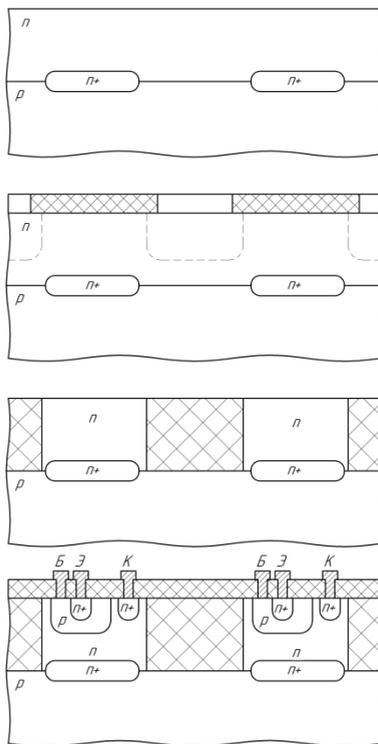


Рисунок 41 – Упрощенная схема изготовления ИМС по технологии комбинированной изоляции изопланар 1

А вот дальше начинаются существенные различия. На поверхности эпитаксиального слоя создается маска для проведения глубокого локального травления между скрытыми p^+ слоями для выделения $n - p^+$ карманов. Глубину локального травления следует

выбирать с учетом участия кремния в процессе роста изолирующего слоя SiO_2 . Для локального травления и оксидирования используется одна и та же Si_3N_4 -маска, что сокращает общее число операций и позволяет удалить слой SiO_2 , который наращивается поверх этой маски, осаждением из парогазовой фазы. Таким образом, образуются $n - p^+$ карманы, разделенные с боков диэлектриком и изолированные обратносмещенным p - n переходом от полупроводниковой подложки. В дальнейшем, в полном соответствии с планарной технологией формируются p - r - n транзисторы в изолированных карманах.

Таким образом, достигается главная цель – формирование комбинированной изоляции, но сам по себе транзистор остается полностью планарным. Это подразумевает все недостатки, присущие планарной технологии, за исключением теплоотвода, так как подложку можно взять сильнолегированную, что увеличит отвод тепла в объем полупроводника и в дальнейшем в корпусе ИМС.

6.3.2. Процесс изопланар 2

Принципиально отличается от процесса изопланар 1 только конструкцией формируемого основного элемента p - r - n транзистора. Конечный результат данной технологии представлен на рисунке 42.

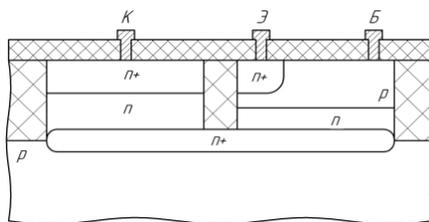


Рисунок 42 – Конечный результат изготовления ИМС с комбинированной изоляцией по технологии изопланар 2

Данный ТП отличается тем, что кроме выделения $n - p^+$ кармана, этот карман разделяется диэлектрической перегородкой на коллекторную и эмиттерно-базовую области, соединенные между собой скрытой p^+ областью. Коллектор транзистора как бы вынесен из основного элемента. Что это дает? А дает это очень и очень многое:

- во-первых, коллекторно-базовый переход, наиболее нагруженный в активном режиме работы биполярного транзистора, получается прямолинейным, что повышает предельные напряжения, на которых он может работать и уменьшает его площадь, что приводит к существенному повышению рабочей частоты данного транзистора (зависит только от разрешающей способности литографических процессов);

- во-вторых, эмиттерно – базовый переход тоже имеет только с одной стороны нелинейность, препятствующую увеличению напряжения, прилагаемого к нему;

- в-третьих, поскольку области базовой диффузии и эмиттерной (совместно с приконтактной областью p^+ коллектора) своими краями выходят на толстый диэлектрический слой боковой изоляции, то точность изготовления шаблонов и их совмещения в данном процессе существенно ниже, чем в предыдущем процессе.

Таким образом, мы можем утверждать, что технология изопланар 2:

- существенно повышает предельную частоту работы изготавливаемой ИМС;

- существенно повышает возможные напряжения работы данной микросхемы;

- существенно способствует увеличению плотности упаковки биполярной ИМС и ее степени интеграции;

- существенно снижает требования для точности литографических процессов, используемых в конкретном маршруте.

Таким образом, мы можем утверждать, что данная технология является меза-эпитаксиально-планарной и позволяет совместить преимущества планарной и меза-технологии, она позволяет избежать неоднородности электрического поля на периферии планарного р-п-перехода; уменьшаются паразитные емкости между активными областями структуры; повышается качество изоляции и степень интеграции ИМС. Это одна из самых совершенных технологий изготовления биполярных ИМС.

Попыткой усовершенствовать данный процесс можно считать технологию эпипланар (рисунок 43).

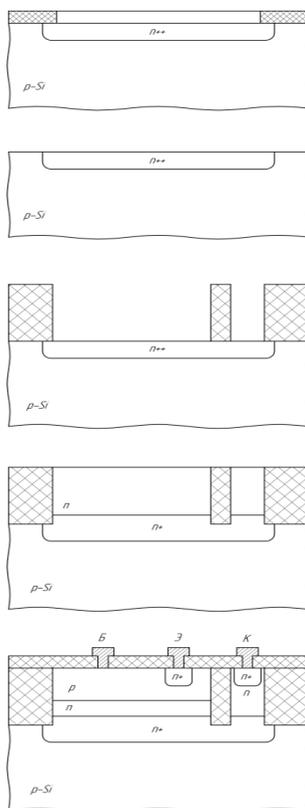


Рисунок 43 – Упрощенная схема изготовления ИМС с комбинированной изоляцией по технологии эпипланар

Принципиальным отличием от предыдущего метода можно считать, то, что после легирования для создания n^+ слоя не осуществляется наращивание эпитаксиального слоя n . Сразу после этого происходит изготовление боковой диэлектрической изоляции по схеме изопланар 2 (1). Формирование полупроводникового коллекторного кармана $n - n^+$ производится методом локальной автоэпитаксии кремния во вскрытых карманах. С дальнейшим формированием транзистора по планарной технологии. Так что процесс остается эпитаксиально-планарным (исключается формирование мез).

Преимущество:

- отсутствие глубокого локального травления кремния перед выделением областей транзисторов на поверхности подложки;
- и, соответственно, сокращение количества технологических операций.

Но, несмотря на то, что данный процесс (вроде бы) технически проще, он не прижился. Так как имеет свои существенные недостатки главным из которых является:

- плохое качество эпитаксиально-выращенного слоя в локальном окне контактной маски.

Еще одной вариацией технологии изопланар 2 является процесс полипланар.

6.3.3. Процесс полипланар

Он основан на использовании анизотропного локального травления кремния для получения боковых стенок карманов в виде узких V-образных канавок, как это показано на рисунке 44. Рассмотрим данный процесс более подробно, так как его можно считать вершиной технологии комбинированной изоляции биполярных структур.

Планарные структуры изготавливают на пластинах (100) структуры, что (как мы уже отмечали раньше) позволяет щелочным травлением формировать V-образные канавки за счет анизотропности процесса щелочного травления.

В основу данного способа положена та же структура со скрытым n^+ слоем и эпитаксиально выращенным кремнием n типа, как и в технологии изопланар 1 (2). Но первое что с ней делают – это проводят базовую диффузию акцепторной примеси в эпитаксиальный n слой, для чего создается контактная маска, которая перекрывает примерно половину будущего $n - n^+$ кармана.

Затем, удалив предварительно использованную маску, формируют контактную маску для глубокого локального щелочного травления, которое позволяет получить узкие V-образные канавки, выделяющие $n - n^+$ карман с готовой базовой областью. Следующим шагом будет формирование маски, и диффузия донорной примеси для изготовления эмиттерной области и приконтактной области коллектора. Контактная маска после диффузии также подвергается удалению.

Затем поверхность пластины и боковых стенок карманов изолируют двойным слоем $SiO_2-Si_3N_4$ или тройным $SiO_2-Si_3N_4-SiO_2$ слоем (углубления V-образных канавок могут быть заполнены поликремнием, но, как правило, толстый диэлектрический слой обеспечивает достаточный сглаживающий эффект, что исключает проблемы с разноразмерной межэлементной коммутацией).

В целом о данном маршруте можно сказать, что он обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с ранее рассмотренными:

- применение V-образных изолирующих канавок повышает степень интеграции так как их площадь сравнительно невелика;
- полипланарная технология повышает быстродействие ИМС;
- повышает радиационную стойкость ИМС;
- повышает процент выхода годных микросхем.

Как видим, этот ТП является также меза-эпитаксиально-планарным, как и любой современный технологический процесс микроэлектроники. На этом мы завершим знакомство с технологией биполярных ИМС. Ибо вариантов типовых маршрутов существует ну если и не бесконечное множество, то их действительно очень и очень много. Главное заключается в том, что комбинируя имеющиеся варианты, а также применяя различные способы литографии и легирования, мы можем изготавливать практически любой вариант конструкции полупроводниковой элементной базы.

6.4. Примеры типовых технологических маршрутов МОП (МДП) ИМС

Наиболее широкое применение нашли МОП ИМС с транзисторами с индуцированными каналами. Они позволяют наиболее просто реализовать согласование схем и реализовать универсальные логические функции. Исторически первыми стали ИМС с МОП транзисторами с каналами р тира. Это обусловлено тем, что при изготовлении n МОП транзисторов технологи столкнулись с инверсией электропроводности тонкого слоя полупроводника под диэлектриком, приводящей к короткому замыканию между соседними транзисторами. Надо сказать, что МОП транзисторы с изолированным затвором в ИМС изготавливать значительно проще, так как они не требуют дополнительной изоляции. Когда сформированы области стока и истока, то при приложении напряжения между ними ток может потечь только тогда, когда на затворе имеется соответствующее напряжение, которое приводит к возникновению канала между данными областями. Связь между соседними транзисторами полностью исключена, если только нет проводящего канала, соединяющего области n^+ , выполняющие функции стока и истока, так как один из р-n переходов находится под обратным смещением. Один из наиболее важных элементов конструкции МОП транзисторов с изолированным затвором – это подзатворный диэлектрик. К нему предъявляются очень жесткие требования:

- высокая электрическая прочность;
- минимальный накопленный заряд в объеме и на границе раздела полупроводник – диэлектрик;
- максимальная стабильность свойств;
- максимальная плотность без возникновения микропор;
- и так далее.

Второй по важности элемент конструкции данных транзисторов – это затвор. Он, как правило, выполняется из металла. И он не должен сильно перекрывать области стока и истока! При изготовлении затвора меньше длины канала (расстояния между стоком и истоком) транзисторы с индуцированным каналом становятся неработоспособными. Если длина затвора больше длины канала, то работоспособность транзистора не подвергается сомнению, но чем больше затвор перекрывает области стока и истока, тем больше паразитная емкость между управляющей цепью затвора и выходным контуром исток – сток, что приведет к резкому снижению рабочей частоты данного конкретного транзистора. Поэтому, решение данной дилеммы является нетривиальной инженерной задачей, приводящей, как правило, к существенному усложнению технологического процесса, а также служащей вдохновением, для изготовления все более совершенных конструкций транзисторов в МОП ИМС. Ибо МОП ИМС – это практически и есть основа современной цифровой электроники. Все процессоры и их окружение изготовлены именно на данном принципе.

6.4.1. Изготовление МОП ИМС по толстооксидной технологии

Этот технологический маршрут, не имел бы шансов в современной электронной промышленности, если бы не был настолько прост и дешев. В сравнении с маршрутами биполярных ИМС – это практически можно назвать примитивом. Толстая оксидная пленка возникает потому, что в процессе изготовления ИМС не производится удаление масок, формируемых при диффузии. Это способствует снижению паразитных емкостей в готовом транзисторе.

МОП ИМС с каналами

Изготавливают по стандартной планарной технологии как это показано на рисунке 45.

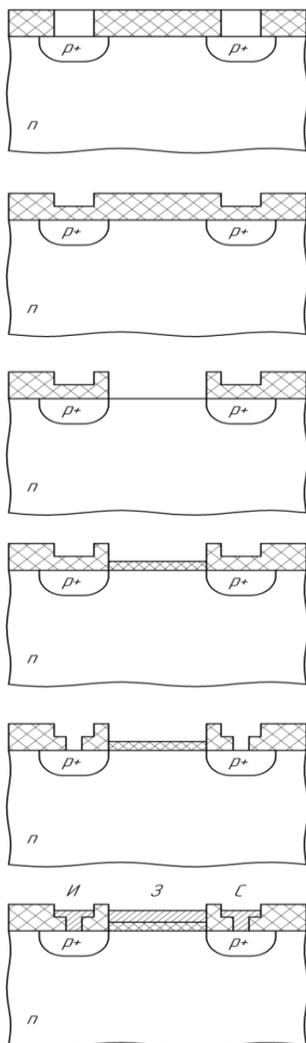


Рисунок 45 – Упрощенная схема изготовления МОП ИМС по толстооксидной технологии

Берется подложка n типа, на поверхности которой изготавливается контактная маска для диффузии акцепторной примеси. И формируются p^+ области стока и истока (без удаления контактной маски). Затем производится вскрытие окна под подзатворный диэлектрик, который наносится на всю поверхность подложки. Главная сложность процесса заключается именно в том, чтобы вскрыть окно с высокой точностью. Именно это препятствует достижению хороших результатов (точность совмещения). После нанесения подзатворного диэлектрика, который одновременно служит изоляцией для формирования межэлементной коммуникации, осуществляется вскрытие окон для контакта с легированными областями полупроводника и изготовление межэлементной коммуникации. Толщина конечного оксида над активными областями стоков и истоков около 1 мкм, над исходной поверхностью n кремниевой пластины 1,5 мкм.

Как бы мы не старались, перекрытие p^+ областей и затвора составляет 2-3 мкм и уменьшить его технически не возможно. Фактически эта задача неразрешима так как совмещение осуществляется с помощью литографии и затруднено из-за неопределенности границ p - n переходов истоков и стоков, а также из-за необходимости прецизионного травления толстого слоя диэлектрика. При толщине подзатворного диэлектрика 0,1 мкм перекрытие канала затвором составляет 2-3 мкм.

При всех своих недостатках эта технология обеспечила себя долговечностью по ряду причин:

- она проста и дешева (всего три литографических процесса включая литографию по слою металла при формировании межэлементной коммутации);
- обеспечивает высокий процент выхода годных ИМС;
- не требует жестких условий для реализации технологического процесса, и высокотехнологичного оборудования.

Поэтому, данный технологический маршрут до сих пор находит свое применение при изготовлении дешевых цифровых ИМС, например, для изготовления калькуляторов.

Технология формирования n-МОП структур отличается от приведенной выше темы, что после формирования в p-Si n+ карманов с внешних сторон от них производят внедрение ионов бора для создания p+ областей, которые ограничивают эффект инверсного n слоя под диэлектриком. Это выглядит, так как показано на рисунке 46.

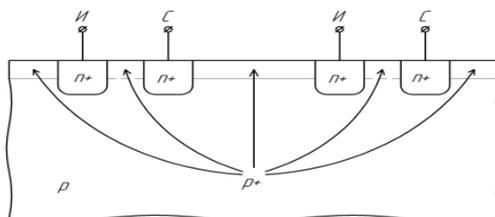


Рисунок 46 – Особенности изготовления МОП ИМС с индуцированными n каналами

В остальном процесс полностью идентичен ТП по изготовлению p-канального транзистора, p+ область между транзисторами очень интенсивно насыщена, что как мы и говорили выше, предотвращает инверсию электропроводности полупроводника p типа. Но это не всегда выгодно при легировании между областями стока и истока в транзисторе, так как это повышает напряжение отпирания транзистора и снижает быстродействие транзисторов с n каналами. Тем не менее, именно n канальная технология стала доминирующей в электронике, так как подвижность электронов, как основных носителей заряда, намного выше чем подвижность дырок. Поэтому быстродействие n канальных МОП транзисторов значительно выше быстродействия p канальных. В настоящее время p

канальные транзисторы встречаются только в КМОП – комбинированных МОП ИМС. Учитывая это, мы в дальнейшем будем говорить именно об n канальных транзисторах при изготовлении ИМС, но не будем заострять внимание на операции по дополнительному введению акцепторной примеси для предотвращения инверсии приповерхностного слоя кристалла.

6.4.2. Изготовление МОП ИМС с самосовмещенными затворами

Решение проблемы точности перекрытия канала МОП транзистора затвором, достаточно очевидно. Для этого необходимо использовать затвор транзистора в качестве элемента маски при формировании областей стока и истока. Однако обычный металлический затвор, который в транзисторах, как правило, изготавливается из алюминия, не может служить элементом маскирования. Так как температура плавления алюминия порядка 660°C , а при любом способе легирования областей температура термообработки выше. Поэтому исторически первым способом, позволившим выполнить так называемое самосовмещение затвора и канала стала технология с поликремневыми затворами, которая показана на рисунке 47.

Предположим, что мы изготавливаем МОП ИМС с индуцированными каналами n типа. Поэтому берем подложку $p - \text{Si}$ и для начала формируем контактную маску, которая будет ограничивать области стока и истока за пределами транзистора. Затем производится одним из возможных способов формирование слоя подзатворного диэлектрика по всей площади поверхности ИМС (около $0,1 \text{ мкм}$). Следом производят осаждение относительно тонкого слоя поликристаллического кремния (около $0,5 \text{ мкм}$). Из сформированного сэндвича в центре площадки, отведенной для расположения МОП транзистора, изготавливается будущий затвор. И только после этого производится легирование, в данном случае

методом термической диффузии, для изготовления областей n^+ , выполняющих функции стока и истока транзистора.

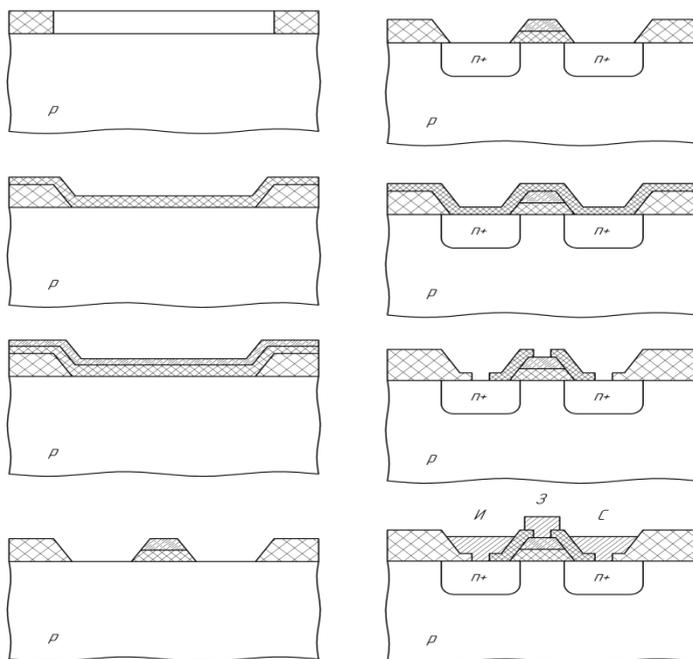


Рисунок 47 – Упрощенная схема изготовления МОП ИМС по технологии с поликремневыми самосовмещенными затворами

Одновременно с получением n^+ областей идет сильное легирование поликремневого затвора, что позволяет существенно повысить электропроводность материала затвора и, следовательно, понизить потери энергии при управлении данным транзистором. Далее производится формирование изолирующего диэлектрического слоя и межэлементной коммутации. Операция по предотвращению инверсии электропроводности под слоем диэлектрика в данном случае не показана, но она может быть выполнена по всей площади поверхности ИМС до начала формирования самого тран-

зистора, что сокращает количество литографических операций. Как видим, в данном случае, имеет место практически классическая планарная технология по изготовлению ИМС.

Данная технология по сравнению с толстооксидной обладает рядом преимуществ:

- обеспечивает высокую степень интеграции, которая ограничивается только разрешающей способностью литографических процессов;
- замена алюминиевых затворов на поликремниевые понижает пороговое напряжение транзисторов и позволяет применять высокотемпературные обработки после формирования затворов (например, отжиг для улучшения свойств n^+ областей);
- степень перекрытия затвором областей стока и истока определяется только степенью проникновения легирующей примеси под затвор, выполняющий функцию маски, что существенно повышает быстродействие транзисторов.

К недостаткам данной технологии можно отнести:

- высокое сопротивление поликремневых затворов, поэтому начали применять затворы из силицидов тугоплавких металлов, что сильно понижает сопротивление (или комбинаций поликремний – силицид);
- использование термической диффузии не может обеспечить нулевое перекрытие областей стока и истока затвором, что ограничивает быстродействие данных ИМС.

Вариантом, позволяющим усовершенствовать данную технологию можно считать применение ионного легирования при формировании областей стока и истока. Технологическая схема практически идентична, описанной выше, отличие заключается в том, что для затворов применяют ванадий, молибден, вольфрам и некоторые другие тугоплавкие металлы. Ионное внедрение производится без вскрытия окон в тонком подзатворном диэлектрике.

Энергия ионов подбирается такой, чтобы материал затвора и оксид служили эффективной маской. Обязателен последующий отжиг.

В чем преимущества применения ионного легирования?

Ионное легирование практически не дает перекрытия n^+ областей затвором и проводится с использованием металлических масок, а технология литографии металлов отработана значительно лучше и обеспечивает более высокую точность. Это приводит к существенному росту предельной рабочей частоты МОП ИМС.

Тонкий под затворный оксид не подвергается высокотемпературным обработкам как при наращивании поликремния, так и при легировании, что улучшает его параметры.

6.4.3. Диффузионно-ионная технология изготовления структур МОП с самосовмещенными затворами

Рассмотрим еще один вариант, позволяющий совместить достоинства двух предыдущих технологий, а также совместить возможности термического легирования и сверхмалого перекрытия областей стока и истока затвором, которое достигается при ионном легировании.

Схема во многом аналогична обычной толстооксидной технологии, но отличается тем, что после нанесения пленки металла электроды затворов формируют таким образом, чтобы их длина была меньше длины каналов. В данном виде сформированный транзистор не работоспособен. Однако после формирования металлизации по всей площади поверхности ИМС проводят внедрение ионов той же примеси, которой были легированы диффузионные n^+ области, как это показано на рисунке 48.

Энергия ионов, как и в предыдущем случае, выбирается достаточной лишь для проникновения через тонкий слой подзатворного диэлектрика – это позволяет практически идеально совместить длину каналов и затвора.

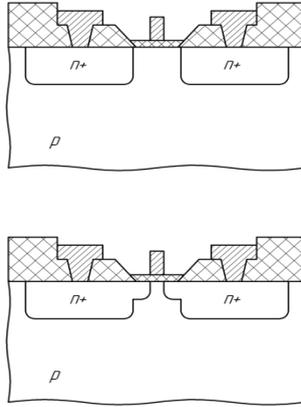


Рисунок 48 – Упрощенная схема получения МОП ИМС по диффузионно-ионной технологии

Данный комбинированный метод позволяет существенно уменьшить длину каналов и, следовательно, повысить быстродействие и степень интеграции ИМС в целом.

6.5. Примеры типовых технологических маршрутов изготовления комплементарных МОП (МДП) ИМС

КМОП ИМС отличаются высокой помехоустойчивостью, малым потреблением мощности и высоким быстродействием. Их можно изготавливать разными способами:

- на пластинах Si с однородным эпитаксиальным слоем;
- на легированных пластинах с карманами другого типа проводимости;
- на двух пластинах разного типа проводимости (бикристалльные ИМС);
- на КНС структурах и т.д.

По сути, технологические маршруты для изготовления КМОП структур, не отличаются от рассмотренных выше маршрутов (особенно при изготовлении так называемых бикристалльных ИМС).

Наиболее распространены варианты с самосовмещенными затворами, ионным и диффузионно-ионным легированием.

6.5.1. Изготовление КМОП ИМС на одной пластине с самосовмещенными затворами

Их можно изготавливать путем создания р карманов в n-Si или n карманов в p-Si, а также двух карманов в слаболегированном эпитаксиальном n⁻ слое на n⁺ подложке. И далее в этих карманах формируются транзисторы с соответствующими каналами. Рассмотрим пример формирования с подложкой n типа и карманом p типа (рисунок 49).

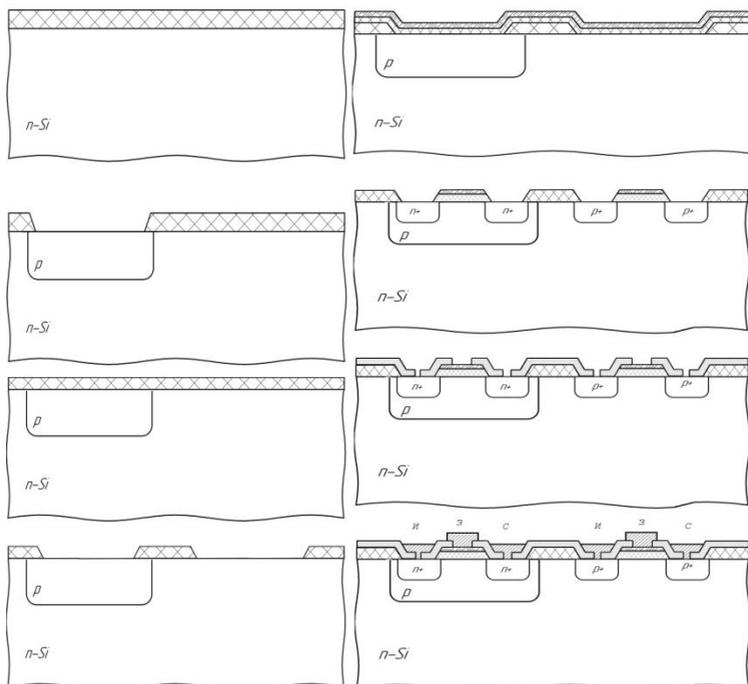


Рисунок 49 – Упрощенная схема ТП изготовления КМОП ИМС на одной пластине с самосовмещенными затворами

На рисунке отражена упрощенная технология с подложкой n типа и карманом p типа с поликремневыми самосовмещенными затворами. Операция подлегирования до p^+ опущена по двум причинам, во первых она при создании КМОП ИМС данного типа может быть не обязательна (n -МОП транзисторы и так изолированы друг от друга p карманами), во вторых при ее реализации повышаются напряжения запираения n -МОП транзисторов (если реализовать подлегирование между карманов n^+ стока и истока, что не очень хорошо сказывается на работе КМОП ИМС). В целом данная технология обладает всеми преимуществами и недостатками технологии самосовмещенных поликремневых затворов рассмотренной выше. Данный технологический маршрут можно рассматривать как практически 100% планарную технологию применительно к МОП ИМС.

6.5.2. Изготовление КМОП ИМС по технологии КНС

Микросхемы, изготавливаемые с применением технологии кремний на сапфире (КНС), отличаются низкими паразитными емкостями между соседними элементами и малыми токами утечки (что говорит о высоком качестве изоляции). Уменьшение размеров элементов, за счет повышения разрешающей способности литографических процессов, и уменьшение внутренних емкостей, за счет применения принципа самосовмещенных размеров затворов, существенно повышает быстродействие ИМС. Они кроме того отличаются стойкостью к радиации, малой рассеиваемой мощностью.

При их изготовлении применяются те же технологические методы, что и при изготовлении монокристаллических МОП-ИМС. Рассмотрим схему ТП, представленную на рисунке 50.

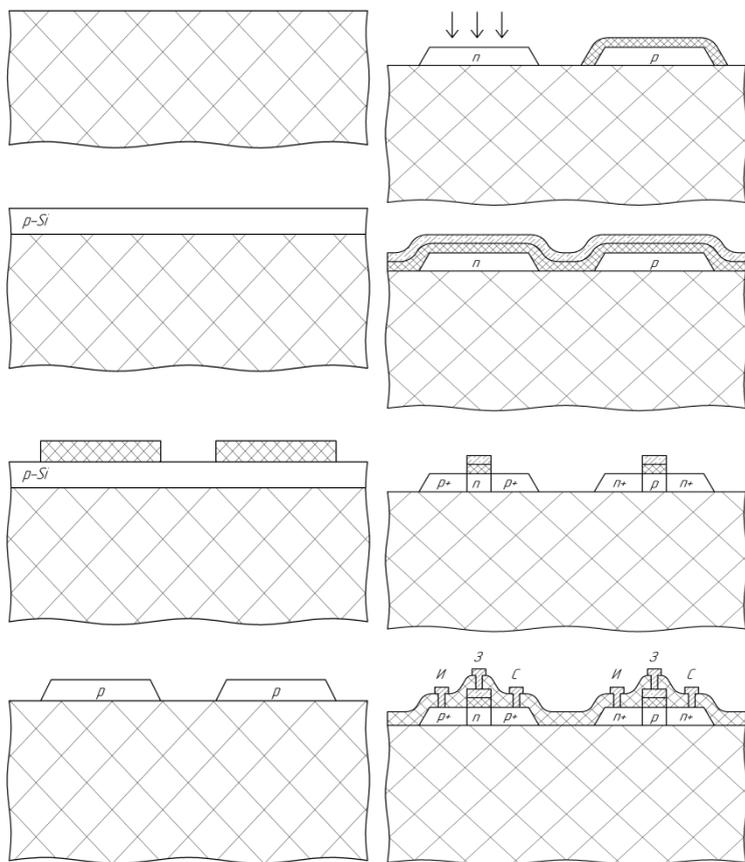


Рисунок 50 – Упрощенная схема ТП изготовления КМОП ИМС с применением технологии КНС

Как видим, исходной подложкой в этом процессе является диэлектрическая монокристаллическая подложка из так называемого лейкосапфира (химическая формула Al_2O_3), что и обуславливает высокое качество изоляции. На поверхности этой подложки методом газофазной эпитаксии формируют слаболегированный слой полупроводника (Si), что и послужило основанием для названия

КНС. Из полученного слоя литографией формируют отдельные островки кремния (мезы), которые в дальнейшем послужат основой полупроводниковых активных элементов ИМС. В случае КМОП ИМС часть островков легируют для получения электропроводности противоположного типа. При этом остальные закрываются защитной маской. Затем в соответствии с принципом самосовмещенных затворов, осаждаются слой подзатворного диэлектрика и слой, из которого в дальнейшем будет сформирован сам затвор транзистора. Если используется поликремневый затвор, то осаждается поли Si. Если металлический, то он формируется из тугоплавкого металла или силицида металла (см. выше). После этого на поверхности островков формируют элемент маски в виде затвора с подзатворным диэлектриком и легируют оставшуюся непокрытой часть полупроводникового островка в соответствии с типом формируемого транзистора. Донорной примесью для изготовления n-МОП транзистора, и акцепторной – для p-МОП транзистора. Далее на поверхность осаждается изолирующий диэлектрический слой и формируется межэлементная коммутация.

Существуют несколько разновидностей типовых маршрутов КНС структур, но все они могут быть охарактеризованы, как было сказано выше. Данный типовой процесс является примером типичного комбинированного меза-эпитаксиально-планарного подхода. Есть только два недостатка данной технологии:

- достаточно дорогое производство относительно небольших (с точки зрения геометрии) подложек искусственного сапфира;
- относительно низкое качество Si при его гетероэпитаксии на поверхность диэлектрической подложки.

Наряду с рассмотренными ТП существуют и другие. Технология ИМС постоянно совершенствуется, идет поиск новых конструктивно-технологических решений.

7. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕЖЭЛЕМЕНТНОЙ КОММУТАЦИИ

Межэлементная коммутация – это одна из важнейших составляющих работоспособности и надежности эксплуатации ИМС и всей ЭКБ современной электроники. Очевидно, что она должна осуществляться высокопроводящими металлами и обладать хорошими технологическими характеристиками для современной полупроводниковой электроники.

Степень сложности и вид металлизации зависит от степени сложности, области применения и типа технологического процесса изготовления ИМС. В качестве материала металлизации полупроводниковых ИМС чаще всего выступает алюминий (Al).

Чем так хорош алюминий? Он имеет:

- достаточно высокую степень электропроводности;
- позволяет сформировать низкоомный контакт к р и n Si;
- имеет достаточно хорошую адгезию к Si и SiO₂;
- его применение технологично, хорошо освоено;
- алюминий недорог относительно других хороших проводников;
- в отличие от меди образует с кремнием силицид, а не диффундирует в объем, легируя области контакта;
- пластичен и, следовательно, стоек к колебаниям температуры (ИМС в процессе изготовления и эксплуатации греются).

Несмотря на столь внушительный список достоинств, применение алюминия имеет и свои существенные недостатки, которые привели в настоящее время со снижением размеров элементов ИМС и увеличением степени интеграции к необходимости изготовления многослойной металлизации:

- удельная электропроводность на единицу площади сечения алюминия существенно меньше, чем у меди и серебра;

- алюминий плохо паяется и не удобен при формировании сварного контакта;
- он подвержен (более других высокопроводящих металлов) электродиффузионному разрушению при превышении пороговой плотности тока для тонкопленочных проводников.

7.1. Однослойная алюминиевая металлизация

Применяется преимущественно в ИМС малой и средней степени интеграции, не слишком мощных, работающих на частотах до 1 ГГц, не рассчитанных на долговечность (низкие надёжностные характеристики, обусловленные склонностью к электродиффузионному разрушению).

Процесс получения однослойной алюминиевой металлизации состоит в нанесении тонкой пленки металла и защиты поверхности. Более подробно мы рассмотрим этот процесс несколько позже.

Достаточно сказать, что осаждение тонких пленок металлов хорошо освоенный и давно практикуемый ТП. После осаждения пленки металла производится литография по слою металла с целью формирования межэлементной коммутации.

Процесс литографии, в целом, не отличается от рассмотренного выше в разделе 4.6 (подготовка поверхности, нанесение слоя резиста, термообработка, экспонирование и проявление резиста, задубливание, травление слоя металла в окне резистивной маски, удаление резистивной маски), но для переноса рисунка на слой алюминия используются специфические травители (щелочные и кислотные). Наиболее широко в производстве ИМС используется состав, состоящий из концентрированной азотной кислоты HNO_3 (3 %), концентрированной ортофосфорной кислоты H_3PO_4 (76 %), ледяной уксусной кислоты CH_3COOH (15 %) и воды (5 %) по объему при температуре 30–40°C. Дефектность данного процесса обусловлена:

- недопроявленным резистом;
- плохой смачиваемостью поверхности металла;
- неравномерностью толщины пленки алюминия;
- напряжениями в пленках, сформированных на ступеньках рельефа;
- гальваническим ускорением травления из-за наличия преципитатов Al – Cu;
- нестабильностью температуры травителя (больше ± 1 °C).

Эти факторы приводят либо к перетравливанию дорожек алюминия и увеличивают вероятность их обрыва, либо к закорачиванию шин металлической разводки.

7.2. Многослойная металлизация

В ряде случаев многослойная металлизация гораздо больше отвечает предъявляемым требованиям (например, для защиты от электродиффузионного разрушения проводников в ИМС с большой плотностью тока). Однако ее применение ограничено, так как она менее технологична и ее изготовление существенно дороже. Как правило, многослойная металлизация содержит от двух до четырех слоев металла с различным назначением:

- Первым является контактный слой, который выполняется из металла слабо проникающего в объем полупроводника и обладающего хорошей адгезией к традиционным изолирующим материалам ИМС. В качестве таких металлов применяют сверхтонкие слои W, Mo, Cr, Ni, Al, Ti, а также силициды некоторых других металлов.

- Вторым является так называемый проводящий слой, который должен обеспечивать высокую электропроводность и (не всегда, но часто) качественный контакт к внешней коммутации кристалла в корпусе. Это Cu, Al, Au.

- Между этими слоями нередко требуется наличие так называемого разделительного (или барьерного) слоя, который применяется в случаях, когда сложно подобрать хорошо согласующиеся материалы контактного и проводящего слоёв. Барьерный слой предотвращает образование интерметаллических соединений и препятствует диффузии между слоями.

- Последним слоем (применяется не всегда) является так называемый коммутационный слой. Он предназначен для обеспечения качественного контакта между проводящим слоем и проводниками внешней коммутации кристалла в корпусе. В основном это необходимо для обеспечения качества паяного соединения если применяется пайка, а не сварка. В качестве этих материалов применяют Au или Ni.

Многослойная металлизация обеспечивает более высокую надежность и большую плотность тока. Однако эти системы проводников ИМС менее стабильны при колебаниях температуры. Термоциклирование приводит к обострению внутренних напряжений в многослойной тонкопленочной системе. Это очень хорошо иллюстрируется отказами микропроцессорных систем при перегреве, так как в них металлизация, как правило, многослойная и они легко выходят из строя именно из-за обрывов пленочных проводников ИМС.

7.3. Многоуровневая металлизация

Применяется в большинстве больших и сверхбольших ИМС. Повышение числа элементов повышает площадь межэлементных соединений, поэтому их размещают в несколько слоев, разделенных изоляцией.

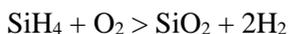
Металлические слои многоуровневых систем могут быть одно- или многослойными и должны отвечать тем же требованиям, как и при одноуровневой изоляции. Особо высокие требования предъявляются к отсутствию выступающих холмов и капель на

пленках, так как они приводят к коротким замыканиям межэлементной коммутации ИМС.

Изолирующие диэлектрические пленки должны иметь:

- высокое напряжение пробоя;
- низкую диэлектрическую постоянную ϵ ;
- низкие диэлектрические потери $\text{tg}\delta$;
- минимальное химическое взаимодействие с прилегающими пленками;
- низкий уровень механических напряжений;
- низкую плотность связанных зарядов;
- технологичность.

Недопустимым является наличие сквозных микроотверстий (микро- и макропор в объеме диэлектрического слоя, разделяющего слои металлизации). Очевидно, что для изготовления диэлектрических слоев в многослойной металлизации нельзя применять ранее рассмотренные процессы окисления. Так как они являются высокотемпературными и не имеют на поверхности кристалла материала для образования высококачественного диэлектрического слоя. Поэтому для формирования межслойной изоляции наиболее часто используют процессы химического осаждения из парогазовой фазы. Наиболее низкотемпературным, обеспечивающим высококачественные диэлектрические слои процессом является осаждение SiO_2 из моносилана SiH_4 .



Реакцию проводят в диапазоне температур 200–400°C. Недостатком является горючесть и взрывоопасность силана. Пленки формируются очень чистыми, но из-за низких температур получаются неплотными. Во избежание этого нужно строго регулировать концентрацию силана в газовой фазе и подавать его непосредственно на поверхности пластин, предотвращая рост SiO_2 в газовой фазе

7.4. Основы тонкопленочной технологии

Нанесение пленок или слоев на поверхность деталей или изделий в условиях вакуума (1×10^{-7} Па). Его используют в планарной технологии полупроводниковых микросхем, в производстве тонкопленочных гибридных ИМС и других технологиях микроэлектроники. Методом вакуумного напыления наносят металлы (Al, Au, Cu, Cr, Ni, V, Ti и другие), сплавы (например, NiCr, CrNiSi), химические соединения (силициды, оксиды, бориды, карбиды и другие), стекла сложного состава, керметы.

Вакуумное напыление основано на создании направленного потока частиц (атомов, молекул или кластеров) наносимого материала на поверхность изделий и их конденсации. Процесс включает несколько стадий:

- переход напыляемого вещества или материала из конденсированной фазы в газовую;
- перенос молекул газовой фазы к поверхности изделия;
- конденсацию их на поверхность;
- образование и рост зародышей;
- формирование пленки.

По способу перевода вещества из конденсированной в газовую фазу различают вакуумное испарение и ионное распыление. При вакуумном испарении мы можем различать:

- непосредственное резистивное испарение материала (когда материал испаряется за счет Джоулева тепла выделяемого при протекании электрического тока);
- косвенный нагрев, реализующий тот же принцип, но проводником является не сам материал, а его носитель в вакуумной камере (спираль, резистивная лодочка, эффузионная ячейка или иной источник испаряемого вещества с опосредованной передачей тепла от источника к испаряемому материалу);

- электронно-лучевой нагрев мишени испаряемого вещества.

При ионном распылении частицы наносимого вещества выбиваются с поверхности конденсируемой фазы путем ее бомбардировки ионами низкотемпературной плазмы. Вариантами ионного распыления являются:

- катодное;
- магнетронное;
- ионно-плазменное;
- высокочастотное распыление.

Они отличаются друг от друга условиями формирования и локализацией в пространстве низкотемпературной плазмы. Если распыление проводится в присутствии химических реагентов (в газовой фазе), то на поверхности изделия образуются продукты их взаимодействия с распыляемым веществом (например: оксиды, нитриды). Такое распыление называется реактивным.

Перенос частиц напыляемого вещества от источника (места его перевода в газовую фазу) к поверхности подложки осуществляется по прямолинейным траекториям при вакууме не хуже 10^{-2} Па и ниже (вакуумное испарение) и путем диффузионного или конвективного переноса в плазме при давлениях 1 Па (катодное распыление) и 10^{-1} – 10^{-2} Па (магнетронное и ионно-плазменное распыление). Судьба каждой из частиц напыляемого вещества при соударении с поверхностью подложки зависит от ее энергии, температуры поверхности и химического сродства материалов пленки и подложки. Атомы или молекулы, достигшие поверхности, могут либо отразиться от нее, либо адсорбироваться и через некоторое время покинуть ее (десорбция), либо адсорбироваться и образовывать на поверхности конденсат (конденсация). При высоких энергиях частиц, большой температуре поверхности и малом химическом сродстве частица отражается.

Температура поверхности подложки, выше которой все частицы отражаются от нее и пленка не образуется, называется критической температурой вакуумного напыления. Ее значение зависит от природы материалов пленки и поверхности детали и от состояния поверхности. При очень малых потоках испаряемых частиц, даже если эти частицы на поверхности адсорбируются, но редко встречаются с другими такими же частицами, они десорбируются и не могут образовывать зародышей, то есть пленка не растет.

Критической плотностью потока испаряемых частиц для данной температуры поверхности называется наименьшая плотность, при которой частицы конденсируются и формируют пленку.

Структура напыленных пленок зависит от свойств материала, состояния и температуры поверхности, скорости напыления. Пленки могут быть аморфными (стеклообразными), поликристаллическими или монокристаллическими (например, пленки, полученные МЛЭ). Для упорядочения структуры и уменьшения внутренних механических напряжений пленок, повышения стабильности их свойств и улучшения адгезии к поверхности изделий сразу же после напыления без нарушения вакуума производят отжиг пленок при температурах, несколько превышающих температуру поверхности при напылении. Часто посредством вакуумного напыления создают многослойные пленочные структуры из различных материалов.

Вакуумно-напылительные установки

Для вакуумного напыления используют технологическое оборудование периодического, полунепрерывного и непрерывного действия. Установки периодического действия осуществляют один цикл нанесения пленок при заданном числе загружаемых изделий. Установки непрерывного действия используют при серийном и массовом производстве. Они бывают трех видов:

- многокамерные;
- многопозиционные;
- однокамерные.

Первые состоят из последовательно расположенных напылительных модулей, в каждом из которых осуществляется напыление пленок определенных материалов или их термическая обработка и контроль. Модули объединены между собой шлюзовыми камерами и транспортирующим конвейерным устройством. Многопозиционные однокамерные установки содержат несколько напылительных постов (расположенных в одной вакуумной камере), соединяемых транспортным устройством конвейерного или роторного типа.

Основные узлы и системы установок для вакуумного напыления представляют собой самостоятельные устройства, выполняющие заданные функции: создание вакуума, испарение или распыление материала пленок, транспортировку деталей, контроль режимов и свойств пленок, электропитание и так далее.

Любая вакуумная установка для тонкопленочного напыления включает в себя следующие узлы:

- рабочую камеру, в которой осуществляется напыление пленок;
- источники испаряемых или распыляемых материалов с системами их энергопитания и устройствами управления;
- откачную и газораспределительную системы, обеспечивающие получение необходимого вакуума и организацию газовых потоков (состоят из насосов, натекателей, клапанов, ловушек, фланцев и крышек, средств измерения вакуума и скоростей газовых потоков);
- систему электропитания и блокировки всех устройств и рабочих узлов установки;

- систему контроля и управления установкой, обеспечивающую заданные скорость напыления, толщину пленок, температуру поверхности деталей, температуру отжига, физические свойства пленок (содержит набор датчиков, связанных через управляющую микропроцессорную ЭВМ с исполнительными механизмами и устройствами вывода информации);
- транспортирующие устройства, обеспечивающие ввод и вывод деталей в рабочую камеру, точное размещение их на постах напыления и перевод из одной позиции напыления на другую при создании многослойной системы пленок;
- систему вспомогательных устройств и технологическую оснастку (состоит из внутрикамерных экранов, заслонок, манипуляторов, гидро- и пневмоприводов, устройств очистки газов) (рисунок 51).

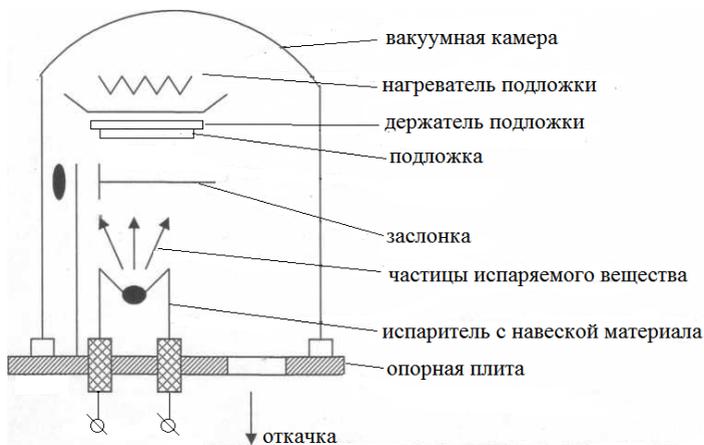


Рисунок 51 – Схематичное изображение типовой вакуумной камеры

Вакуумом (от латинского *Vacuum* – пустота) [7] называют состояние газа или пара при давлении ниже атмосферного. Количе-

ственной характеристикой вакуума служит абсолютное давление. Основной единицей измерения давления в системе СИ служит Паскаль ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$). В практике вакуумных измерений широко используется другая внесистемная единица – миллиметр ртутного столба ($1 \text{ мм.рт.ст.} = 133 \text{ Н/м}^2$ или 133 Па).

Интенсивность протекания физико-химических процессов в вакууме зависит от соотношения между числом столкновений молекул газа со стенками ограничивающего его сосуда и числом взаимных столкновений молекул, характеризующимся отношением средней длины свободного пробега X к характерному (определяющему) линейному размеру сосуда. Это отношение называется числом Кнудсена K_n и оно положено в основу условного разделения областей вакуума на следующие диапазоны: низкий, средний, высокий и сверхвысокий:

Низкий вакуум характеризуется давлением газа, при котором средняя длина свободного пробега молекул газа значительно меньше характерного линейного размера сосуда $X \ll L$.

Низкому вакууму обычно соответствует область давлений $760 - 1 \text{ мм.рт.ст.}$

Средний вакуум: характеризуется давлением газа, при котором средняя длина свободного пробега соизмерима с линейным размером сосуда ($X \sim L$). Область давлений $1 - 10^{-3} \text{ мм.рт.ст.}$

Высокий вакуум: средняя длина свободного пробега много больше линейных размеров ($X \gg L$). Область давлений $10^{-3} - 10^{-7} \text{ мм.рт.ст.}$

Сверхвысокий вакуум: характеризуется давлением газа, при котором не происходит заметного изменения свойств поверхности, первоначально свободной от адсорбированного газа, за время, существенное для рабочего процесса. Обычно этому соответствует область давлений меньше $10^{-7} \text{ мм.рт.ст.}$

Теоретический расчет средней длины свободного пробега молекул газа дается формулой

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 n},$$

где σ – эффективный диаметр молекул, а n – концентрация.

Как видно из этой формулы при постоянной температуре для определенного газа произведение

$$P\lambda = \text{const} = \lambda' (P = nkT),$$

где P – давление, n – концентрация молекул газа, T – температура, λ' – средняя длина свободного пути молекул при 1 мм.рт.ст.

Для воздуха при температуре 298К $\lambda = 4,6 \times 10^{-3}$ см. Из этого следует простая зависимость для оценки длины свободного пробега для различных давлений:

$$\lambda(\text{см}) = \frac{4,6 \times 10^{-3}}{P(\text{мм.рт.ст.})}.$$

Техника получения вакуума [6]

Устройства, служащие для создания вакуума называются вакуумными насосами.

Промышленные вакуумные насосы работают в области давлений от 10^5 до 10^{-10} Па.

Для создания низкого и среднего вакуума применяют так называемые форвакуумные насосы, высокого и сверхвысокого – высоковакуумные насосы. Иногда между ними устанавливают промежуточные (бустерные) вакуумные насосы.

При большом различии в принципах действия и конструкциях, обусловленном многообразием требований к откачному оборудованию, во всех вакуумных насосах для откачки газа используется один из двух способов:

- перемещение газа за счет приложения к нему механических сил в некотором месте вакуумной системы, откуда газ выталкивается;

- связывание газа путем сорбции, химических реакций или конденсации обычно в замкнутой вакуумной системе.

По принципу действия промышленные вакуумные насосы, используемые для получения давлений меньше 10^{-2} Па, разделяют на следующие группы:

1. Насосы объемного действия, в которых перемещение газа осуществляется путем периодического изменения объема рабочей камеры.

2. Эжекторные насосы, в которых происходит турбулентно-вязкостное увлечение газа струей рабочей жидкости или пара.

3. Молекулярные насосы, которые осуществляют откачку путем сообщения молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости в определенном направлении. Насосы этой группы могут быть струйными, действие которых основано на сообщении молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости непрерывно истекающей струей пара и механическими молекулярными, в которых эта скорость сообщается движущимися поверхностями твердого тела.

4. Сорбционные насосы, которые осуществляют откачку газов путем их сорбции на поверхности или в объеме твердых тел. В эту группу входят и адсорбционные насосы, в которых откачка происходит вследствие обратимой физической адсорбции газа при низкой температуре.

5. Криогенные насосы, которые осуществляют откачку путем конденсации откачиваемых газов и паров на поверхностях, охлаждаемых до сверхнизких (криогенных) температур. Разновидностями криогенных насосов являются конденсационные и криосорбционные насосы.

В названиях насосов не всегда отражается принцип действия, но очень часто отмечаются их конструктивное устройство, используемый материал сорбента (геттера), рабочая жидкость и тому подобное.

7.5. Основы толсто пленочной технологии

Понятия толсто- и тонкопленочной технологии характеризуют не столько различие в толщине формируемых пленок сколько различие способов их нанесения. Тонкопленочная технология позволяет получать пленки не более 1мкм. Именно эта цифра является условной границей между тонкими и толстыми пленками. На практике пленки получаемые по толсто пленочной технологии имеют толщину порядка десятков микрометров.

В настоящее время наблюдается некоторое оживление толсто пленочной технологии в связи с расширением области применения в бытовую технику и СВЧ диапазон. Они выгодны при умеренно высоких мощностях рассеивания (2,5–4 Вт/см²), а также когда число пассивных элементов велико, а число активных сравнительно мало.

Преимущества толсто пленочной технологии:

- трудоемкость в три раза меньше чем у тонкопленочной;
- толсто пленочная технология дешевле, так как ниже стоимость оборудования и помещений, рациональный расход материалов и высокий уровень выхода годных ИМС;
- данная технология более проста и не требует высокой квалификации персонала;
- данная технология менее чувствительна к загрязнениям (они частично выгорают при термообработке, а частично не влияют на параметры, так как размеры частиц загрязнений значительно меньше размеров формируемых элементов);

- в толсто пленочной технологии возможны контроль и даже исправления брака после каждой операции;
- толсто пленочные элементы обладают высокой надежностью и могут работать в очень жестких условиях от -130 до $+300^{\circ}\text{C}$ с резкими перепадами температур;
- большая толщина пленок позволяет уменьшить вредные наводки и паразитные емкости при многоуровневой металлизации.

Пасты

Состоят из трех основных компонентов функционального, конструкционного и технологического.

Функциональная составляющая придает пасте те свойства, которые ожидаются от готовой пленки (проводниковые, резистивные или диэлектрические). В традиционных пастах в качестве проводниковой функциональной составляющей используют Ag, Pd, Au и сплавы на их основе. Для полимерных паст применяют благородные металлы типа Cu, Ni, Al, Mo. Для резистивных паст в качестве функциональной составляющей широко используют Pd, Ag₂O, RuO₂, а также рутенаты свинца и висмута и так далее. Для диэлектрических паст используют порошки сегнетоэлектриков типа BaTiO₃, Y₂O₃, а для СВЧ ИМС пасты на основе стекол и ситаллоцементов.

Конструкционная составляющая обеспечивает равномерное распределение частиц функциональной составляющей и адгезию пленки к подложке. Она при формировании пленки не удаляется и остается в готовом элементе. В традиционных пастах используют свинцово-боросиликатные стекла, а в полимерных объемные полимеры – реактопласты.

Технологическая составляющая – это временные органические связующие и растворители, которые вводятся для равномерного распределения компонентов в процессе приготовления пасты для обеспечения определенной консистенции и вязкости. После

нанесения пасты они полностью удаляются в процессе термообработки (при не полном удалении служат источниками дефектов формируемых слоев).

Существуют еще специальные добавки, которые вводят для улучшения адгезии, паяемости, реологических характеристик и тиксотропности (способность сохранять форму при снятии давления и увеличивать текучесть при давлении на пасту типа, фуранкарбоновая и терефталевая кислоты).

Графаретная печать

Она осуществляется в печатных автоматах двумя способами: контактным и бесконтактным. Главное отличие этих двух способов в том, что при контактном способе используются жесткие цельнометаллические маски, располагающиеся непосредственно на поверхности подложки, а при бесконтактном используются эластичные сетчатые маски – трафареты, не прилегающие непосредственно к подложке – основанию как это показано на рисунке 52.

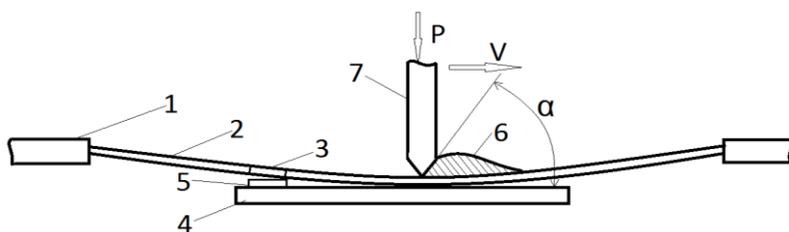


Рисунок 52 – Схематичное отображение процесса трафаретной печати сквозь сетчатый трафарет:

- 1 – рамка – основа сетчатого трафарета; 2 – сетка с рисунком, нанесенным проявленным и задублированным фоторезистом;
- 3 – окно трафарета; 4 – подложка; 5 – отпечаток пасты, продавленной через окно трафарета; 6 – паста; 7 – ракель

В первом случае важное значение приобретает механизм отрыва трафарета от подложки. Отрыв должен происходить строго вертикально без смещения в горизонтальной плоскости. В качестве материала трафарета применяют относительно тонкие слои нержавеющей сталей, в которых методом литографии сформированы отверстия в форме слоев, наносимых на поверхности подложки. Для единичных случаев могут быть использованы просто бумажные трафареты. При использовании сетчатых трафаретов (кстати, в качестве материала сетки может быть использован натуральный шелк, что обуславливает второе название данной технологии – шелкография) маска формируется проявленным и задубленным фоторезистом, нанесенным на сетчатое основание. При этом проблемы отрыва трафарета от подложки не существует, так как отрыв происходит за счет упругости самого трафарета закрепленного на жестком основании без непосредственного контакта с подложкой. Контакт осуществляется только под действием жесткого «ножа» ракеля, продавливающего пасту через отверстия трафарета.

Процесс происходит следующим образом: подложка закрепляется на столике автомата, трафарет устанавливается над ней (не касаясь поверхности подложки), на трафарет наносится порция пасты, опускается рапель с силой прижатия P и перемещается по поверхности трафарета со скоростью V . При этом при перемещении перед ракелем катится «валик» пасты. Огромное значение имеют параметры процесса сила прижатия ракеля P , скорость его перемещения V и угол встречи ракеля с поверхностью трафарета α . При переизбытке усилия прижатия паста будет вычерпываться из апертур отверстий трафарета, что приводит к неравномерности толщины отпечатков и нарушениям геометрии их краев. При большей, чем требуется скорости V , паста не будет перемещаться ракелем равномерным валиком, что приведет к захвату ее объемом

воздушных пузырьков, которые приведут к дефектности формируемых отпечатков. Аналогичное действие производит и нарушение угла встречи.

Для контактного способа печати характерно использование ракелей из нержавеющей стали с углом встречи примерно $45 \pm 5^\circ$, а для бесконтактного полиуретановых ракелей, при этом угол встречи регулируется исходя из прикладываемого усилия прижатия P . Чем меньше α , тем больше P . Не маловажное значение имеют также степень натяжения трафарета и расстояние от трафарета до подложки. В современном оборудовании рекомендуется следовать параметрам, заявленным изготовителем с учетом параметров паст.

Термообработка паст

Как и любая другая термообработка, она включает в себя нагрев выдержку при заданной температуре и охлаждение. Термообработка производится, как правило в конвейерных четырех- или восьми-зонных печах непрерывного действия. Основное распределение температур представлено на рисунке 53.

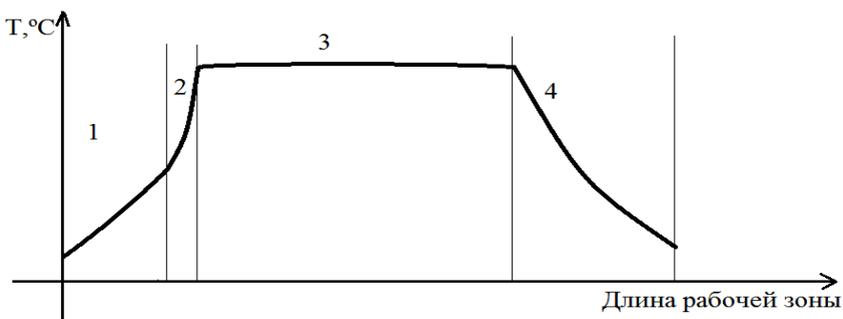


Рисунок 53 – Распределение температур по длине рабочей зоны конвейерной печи при термообработке нанесенных отпечатков паст

На графике можно выделить несколько ключевых зон:

1) зона сушки, где производится относительно медленный нагрев до температур порядка 350–400°C, в которой из пасты удаляются все легколетучие компоненты, обеспечивающие текучесть паст;

2) зона выжигания органической связки и удаления присадок регулирующих реологические свойства паст;

3) зона спекания паст при температурах 700–1000°C (в зависимости от типа паст), в которой происходит постепенное размягчение и расплавление стеклянной связки и образование суспензии с частицами функциональной связки и дальнейшем спекании функциональной составляющей в более крупные конгломераты зерна;

4) зона естественного охлаждения до температур близких к окружающей среде.

Резкий подъем температуры на первом участке может привести к вскипанию жидкой составляющей пасты, что неминуемо вызовет образование дефектов в виде пузырей и разбрызгивания компонентов пасты по поверхности подложки. Еще более критичным к контролю температурного поля и профиля является третий участок спекания, так как при неоднородности поля различные участки формирующегося слоя функционального компонента будут иметь разные свойства, что недопустимо для пленочных элементов. Принудительное охлаждение системы подложка – сформированная пленка допустимо, но не желательно, так как при медленном охлаждении происходит компенсация внутренних дефектов пленочного слоя, а принудительное охлаждение приведет к «замораживанию» сформированных дефектов, что приведет к нестабильности работы пленки.

При всех достоинствах толстопленочной технологии, описанных в начале этого пункта, для нее характерны и существенные

недостатки, которые привели к почти полному отказу от применения данной технологии в микроэлектронике:

- толщина формируемых пленочных слоев определяется толщиной используемых для изготовления трафаретов материалов, что подразумевает толщину в как минимум в несколько единиц и даже десятков микрометров;

- учитывая, что отпечаток не может быть в толщину меньше чем в ширину и длину, мы можем говорить о малой разрешающей способности данной технологии;

- именно по этой причине данная технология сохранилась в основном в силовой электронике, где требуется значительная мощность;

Однако прогресс не стоит на месте и миниатюризация характерна не только на уровне микроэлектронных изделий. В настоящее время устройства РЭС претерпевают миниатюризацию в той же степени, в какой к семидесятым годам прошлого века пришла микроэлектроника. Достаточно посмотреть на технологию поверхностного монтажа, чтобы понять, что это не что иное как толстопленочная технология с размером устанавливаемых компонентов сравнимым с теми, которые применялись и применяются в гибридных ИМС.

8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ СБОРКИ И ЗАЩИТЫ ИМС

Итак, изготовление структуры ИМС завершено. Однако как мы и говорили ранее, ни микросхемы, ни дискретные компоненты не изготавливаются единичными экземплярами. Наоборот, чем больше их расположено на одной подложке, тем дешевле производство и выше качество, так как в едином технологическом цикле производится большое число технически одинаковых изделий. Поэтому после завершения изготовления структуры необходимо провести ряд действий, позволяющих разделить единую подложку на отдельные законченные компоненты и обеспечить их защиту от внешних воздействий.

Процесс разделения – это одна из особо важных операций не только из-за твердости к хрупкости пластины, но также из-за того, что на них уже сформированы элементы и межэлементные соединения ИМС. Их повреждение приводит к браку.

Основные требования к процессу разделения:

- необходимость точной ориентации линии реза;
- сведение к минимуму механических напряжений (из-за нарушений металлизации);
- получение строго вертикальных плоскостей реза боковых сторон кристаллов и пластин;
- сохранение ориентации;
- обеспечение воспроизводимости размеров и форм;
- получение минимальной ширины линии реза.

8.1. Скрайбирование подложек ИМС

После формирования защитных слоев на поверхности ИМС (если они предусмотрены технологическим процессом) и контроля электрических параметров готовых структур пластины разделяют

на единичные кристаллы или платы. Важным является после разделения сохранение ориентации кристаллов в пространстве, так как при автоматизированном производстве переориентация возможна только под руководством человека, что увеличивает вероятность ошибки и существенно повышает себестоимость готового изделия. Поэтому при разделении пластины помещают на липкие эластичные ленты, позволяющие после разделения растянуть ленту, открывая доступ к отдельным кристаллам. Процесс разделения начинают с операции под названием скрайбирование (от английского Scribe – царапать). Эта операция представляет собой нанесение риски на поверхность подложки с целью ослабления ее механической прочности. Резание осуществляют:

- абразивной обработкой;
- лазерным лучом;
- химическим травлением.

Рассмотрим достоинства и недостатки этих трех способов.

Абразивная резка может осуществляться (как и говорилось выше) с применением свободного или связанного абразива. В качестве связанного абразива выступают абразивные диски с внешней режущей кромкой. Их применение легко автоматизируемо и обеспечивает относительную чистоту при резке пластин, что выгодно отличает данный процесс от применения способов со свободным абразивом. Например, резка стальными полотнами с одновременной подачей абразивной суспензии. В этом случае необходимо предусмотреть защиту поверхности кристалла от воздействия абразивной суспензии. Она может существенно загрязнить поверхность кристалла и повредить металлизацию. Поэтому в производстве часто встречается резка дисками с внешней режущей кромкой и почти не используется метод свободного абразива. Достоинства механического абразивного скрайбирования:

- относительная техническая простота, а, следовательно, дешевизна;

- сравнительно небольшие механические напряжения при резании;

- отсутствие термического воздействия на структуру ИМС.

В качестве недостатков следует отметить:

- неровную линию реза (процесс резания – микровыкрашивание кристаллитов);

- возможность из-за этого повреждения кристалла при дальнейшем разламывании;

- загрязнение поверхности абразивом и материалом подложки.

Скрайбирование алмазным резцом, чаще всего применяется для диэлектрических подложек. Так как алмазный резец не обеспечивает достаточную глубину резки. Кроме того – это грубый инструмент, формирующий линию реза с рваными краями.

Разделение лазерным лучом может быть осуществлено либо путем лазерного скрайбирования (то есть с образованием риски), либо сквозным прохождением луча через пластину. Образование разлома или риски происходит за счет частичного испарения материала и плавления. В настоящее время лазерное скрайбирование на современном производстве доминирует благодаря своим многочисленным достоинствам:

- оно повышает в 4-5 раз производительность;

- существенно повышает точность при разделении;

- ослабляет механическое воздействие на подложку;

- повышает процент выхода годных за счет отсутствия сколов.

Однако есть и недостатки:

- достаточно высокая стоимость оборудования;

- необходимость защиты поверхности от загрязнения продуктами испарения и расплавления;

- сильное температурное воздействие определяет зону нарушения структуры полупроводника.

Тем не менее, данный процесс постепенно вытесняет другие способы скрайбирования. Полное лазерное разделение практически не используется, так как термическое воздействие при испарении и расплавлении на всю толщину подложки очень велико и приводит к дефектам структуры ИМС.

Скрайбирование химическим травлением на производстве применяется крайне редко. Это обусловлено целым рядом недостатков, присущих данному процессу:

- необходимость образования контактной маски поверх сформированной межэлементной маски с последующим ее удалением;
- химическая реакция слабоуправляемый процесс особенно при глубоком локальном травлении;
- травление происходит крайне медленно по сравнению с другими способами скрайбирования.

Тем не менее этот способ имеет место и применим в условиях лабораторного или единичного производства при нецелесообразности задействования более высокотехнологичного оборудования.

8.2. Разламывание подложек ИМС

Разламывание пластины после скрайбирования осуществляется, как я и говорил на гибкой клейкой ленте и может быть реализовано различными способами:

- разламывание на полусфере;
- разламывание прокаткой валиком на эластичном основании;
- разламывание прокаткой между двумя валиками.

Разламывание на полусфере реализуется примерно так, как показано на рисунке 54.

Эластичную гибкую ленту с наклеенной подложкой помещают в рабочую камеру (ее первоначальное положение отмечено пунк-

тирной линией). Концы ленты жестко закрепляют и в верхнюю половину камеры подают сжатый воздух, который резко прижимает подложку к гладкой металлической полусфере. В объеме полусферы проделаны каналы, по которым воздух из нижней части камеры уходит в атмосферу, не оказывая сопротивления движению подложки. Так как полупроводниковая пластина надрезана скрайбированием, то она разламывается практически точно по линиям реза. Полусфера удобна тем, что обеспечивает равномерную механическую нагрузку на практически круглую подложку.

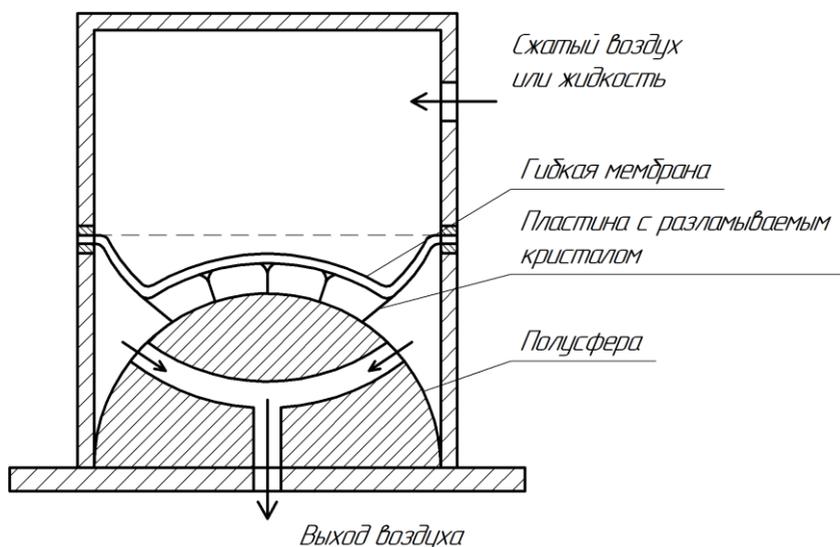


Рисунок 54 – Упрощенная технологическая схема разламывания подложек на кристаллы на полусфере

Различают так же разламывание при прокатке валиком на пружинящем основании, как это показано на рисунке 55 и между двумя цилиндрическими валиками.

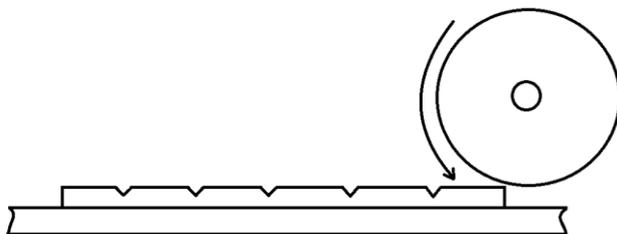


Рисунок 55 – Упрощенная схема разламывания скрайбированной подложки при прокатке валиком на пружинящем основании

Прокатка производится сначала в одном направлении, а затем строго под 90 градусов. Каждый из способов имеет свои достоинства и недостатки. Однако наибольшей производительностью и высокой степенью выхода годных обладает способ прокатки между двумя валиками. Он широко применяется в промышленности и может быть реализован на полуавтомате типа ППП-3.

После разламывания осуществляется контроль с помощью микроскопа с увеличением в 100, 200 раз для выявления механических дефектов, образовавшихся в результате проведения операции и удаления бракованных кристаллов.

8.3. Способы установки подложек и кристаллов ИМС в корпус

Основными требованиями при присоединении полупроводникового кристалла к основанию корпуса являются высокая надёжность соединения, механическая прочность и в ряде случаев высокий уровень передачи тепла от кристалла к подложке. Операцию присоединения проводят с помощью пайки или приклеивания [Остек].

Клеи для монтажа кристаллов могут быть условно разделены на две категории: электропроводящие и диэлектрические. Клеи состоят из связующего вещества и наполнителя. Для обеспечения

электро- и теплопроводности в состав клея, как правило, вводят серебро в виде порошка или хлопьев. Для создания теплопроводящих диэлектрических клеев в качестве наполнителя используют стеклянные или керамические порошки.

Пайка осуществляется с помощью проводящих стеклянных или металлических припоев. Стеклянные припои – это материалы, состоящие из оксидов металлов. Они обладают хорошей адгезией к широкому спектру керамики, оксидов, полупроводниковых материалов, металлов и характеризуются высокой коррозионной стойкостью.

Пайка металлическими припоями осуществляется с помощью навесок или прокладок припоя заданной формы и размеров (преформ), помещаемых между кристаллом и подложкой. В массовом производстве применяется специализированная паяльная паста для монтажа кристаллов.

Связующие вещества

Полимерные клеи различают по типу связующего вещества и по типу материала наполнителя. Органические полимеры, используемые в качестве адгезива, могут быть разделены на две основные категории: реактопласты и термопласты. Все они являются органическими материалами, но существенно отличаются по химическим и физическим свойствам.

В реактопластах при нагреве полимерные цепи необратимо сшиваются в жёсткую трёхмерную сетчатую структуру. Возникающие при этом связи позволяют получать высокую адгезионную способность материала, но при этом ремонтпригодность ограничена.

В термопластичных полимерах не происходит отверждения. Они сохраняют способность к размягчению и расплавлению при нагреве, создавая прочные эластичные связи. Это свойство позволяет использовать термопласты в задачах, где требуется ремонтно-

пригодность. Адгезионная способность термопластичных пластмасс ниже, чем у реактопластов, но в большинстве случаев вполне достаточна.

Третий тип связующего вещества – смесь термопластов и реактопластов, объединяющая в себе преимущества двух типов материалов. Их полимерная композиция представляет собой взаимопроникающую сеть термопластичных и реактопластичных структур, что позволяет использовать их для создания высокопрочных ремонтпригодных соединений при относительно низких температурах (150–200°C).

Каждая система имеет свои достоинства и недостатки. Одним из ограничений в использовании термопластичных паст является медленное удаление растворителя в процессе оплавления. Раньше для соединения компонентов с использованием термопластичных материалов требовалось провести процесс нанесения пасты (соблюдая плоскостность), сушки для удаления растворителя и только затем установки кристалла на подложку. Такой процесс исключал образование пустот в клеящем материале, но увеличивал стоимость и затруднял использование данной технологии в массовом производстве.

Современные термопластичные пасты обладают способностью очень быстрого испарения растворителя. Это свойство позволяет наносить их методом дозирования, используя стандартное оборудование, и устанавливать кристалл на ещё не высушенную пасту. Далее следует этап быстрого низкотемпературного нагрева, во время которого растворитель удаляется, и после оплавления создаются адгезионные связи.

Долгое время имелись сложности с созданием высоко теплопроводящих клеев на основе термопластов и реактопластов. Данные полимеры не позволяли увеличивать содержание теплопроводящего наполнителя в пасте, поскольку для хорошей адгезии тре-

бывался высокий уровень связующего вещества (60–75%). Для сравнения: в неорганических материалах доля связующего вещества могла быть уменьшена до 15–20%. Современные полимерные клеи (Diemat DM4130, DM4030, DM6030) лишены этого недостатка, и содержание теплопроводящего наполнителя достигает 80–90%.

Наполнители

Основную роль в создании тепло-, электропроводящего адгезива играют тип, форма, размер и количество наполнителя. В качестве наполнителя используется серебро (Ag) как химически стойкий материал с наиболее высоким коэффициентом теплопроводности. Современные пасты содержат в себе серебро в виде порошка (микросферы) и хлопьев (чешуек). Точный состав, количество и размер частиц экспериментально подбираются каждым производителем и в сильной степени определяют теплопроводящие, электропроводящие и клеящие свойства материалов. В задачах, где требуется диэлектрик с теплопроводящими свойствами, в качестве наполнителя используется керамический порошок.

При выборе электропроводящего клея следует принимать во внимание следующие факторы:

- тепло-, электропроводность используемого клея или припоя;
- допустимые технологические температуры монтажа;
- температуры последующих технологических операций;
- рабочие температуры микросхемы;
- наличие металлизации соединяемых поверхностей;
- механическая прочность соединения;
- автоматизация процесса монтажа;
- ремонтпригодность;
- стоимость операции монтажа.

Кроме того, при выборе адгезива для монтажа следует обращать внимание на модуль упругости полимера, площадь и раз-

ность ТКЛР соединяемых компонентов, а также толщину клеевого шва. Чем ниже модуль упругости (чем мягче материал), тем большие площади компонентов и большая разница ТКЛР соединяемых компонентов и более тонкий клеевой шов допустимы. Высокое значение модуля упругости вносит ограничение в минимальную толщину клеевого шва и размеры соединяемых компонентов из-за возможности возникновения больших термомеханических напряжений.

В отличие от склеивания пайка кристалла в корпус однозначно обеспечивает высокую прочность посадки, высокую тепло- и электропроводность. Пайка осуществляется эвтектическими припоями, которые обеспечивают мелкокристаллическую структуру слоя припоя, дабы избежать формирования механических напряжений в данном соединении.

Золочение контактирующих поверхностей каких-либо ошутимых результатов не дает. В качестве эвтектических припоев используют сплавы золото – германий или золото – кремний. Подготовленные к пайке детали нагревают в нейтральной атмосфере (осушенном и очищенном азоте) до температуры, несколько превышающей температуру плавления сплава. Эвтектические сплавы золото – германий и золото – кремний содержат (по массе): первый 12% германия и 88% золота, а второй – 6% кремния и 94% золота. Температура плавления соответственно равная 356 и 370°C, ниже температуры плавления каждого из этих материалов.

Использование для пайки эвтектического сплава золото – кремний дает хорошие результаты, но сложность приготовления ограничивает его применение. Кроме того, при изготовлении происходит расслоение сплава. Поэтому чаще применяют эвтектический сплав золото – германий ЗлГр12, примерный режим пайки которым на специальной установке приведен ниже.

Температура поверхности столика $410 + 10^{\circ}\text{C}$.

Усилие на инструменте 0,6 – 0,7Н.

Амплитуда колебаний инструмента 0,08 мм.

Время пайки 7 с.

Пайка кристаллов к контактными площадкам корпусов эвтектическим сплавом состоит из следующих переходов:

- нагрев соединяемых деталей до заданной температуры в атмосфере сухого азота;
- захват прокладки из эвтектического сплава, перенос и укладка на место пайки;
- захват кристалла, перенос и присоединение его к корпусу;
- выдержка заданное время и охлаждение до температуры близкой к комнатной.

Захват, перенос и удержание прокладок и кристаллов выполняются специальным инструментом – вакуумным пинцетом. При этом усилие захвата и удержания прокладки (кристалла) создается вследствие перепада давлений.

8.4. Технологические приемы сборки ИМС в корпус пайка, сварка и склеивание

Пайка

Помимо присоединения кристалла к корпусу пайка используется при установке некоторых компонентов гибридных ИМС на подложку и (иногда) для присоединения выводов корпуса к контактными площадкам.

Пайка – это процесс создания неразъемного соединения деталей путем нагрева и последующего охлаждения при наличии между ними промежуточного материала – припоя.

При нагревании до температуры плавления припой частично проникает в приповерхностные зоны спаиваемых деталей, образуя интерметаллические соединения. При охлаждении припой кристаллизуется у поверхностей соединяемых деталей, вступая с ними в

прочную металлическую связь. Поверхности соединяемых деталей должны быть тщательно очищены от жиров и загрязнений. Растворимость материалов в припой должна быть достаточной для образования прочного шва, но не слишком большой. Припой должен иметь температуру плавления ниже, чем температуры плавления соединяемых деталей (чтобы не ухудшить параметры готовых структур).

Припой не должен изменять своих свойств при рабочих температурах деталей (для микросхем на основе Si 125°C).

Различают низкотемпературную и высокотемпературную пайку, условно до 450°C и выше.

Примеры низкотемпературных припоев:

- сплавы олова со свинцом ПОС;
- олова с висмутом ПОВи (99,4.. 99,6% Sn);
- SAC (Sn, Ag, Cu) – бессвинцовые;
- сплавы AuSi и AuGe (эвтектические) и другие.

Высокотемпературные – сплавы на основе серебра ПСр (содержат Ag, Cu и Zn) и так далее.

Флюсы – это вещества, которые используются для улучшения смачивания поверхностей спаиваемых деталей и их защиты от последующего окисления при повышении температуры. При изготовлении ИМС используют бескислотные антикоррозийные флюсы на основе канифоли типа ФКСп, ФПЭт, ФкТС и на основе цинка ФХЦ.

Сварка

При сборке микросхем сварка почти вытеснила пайку, так как она обеспечивает высокое качество соединений и малое воздействие на параметры систем.

Сварка – это процесс создания неразъемного соединения деталей без участия припоя в результате их сближения на расстояния межатомарного взаимодействия. Она может выполняться с нагревом или без нагрева в зависимости от наличия или отсутствия сжимающего усилия.

Для сборки микросхем наиболее часто используют следующие способы сварки: термокомпрессионную, косвенным импульсным нагревом, ультразвуковую, сдвоенным электродом, лазерную, точечную и шовную, электронно-лучевую, холодную.

Все виды сварки, как правило, применяются для двух основных операций: изготовление коммутации кристалла в корпусе с помощью проволочных или балочных выводов и для герметизации корпусов ИМС. В качестве материалов для изготовления проводников, реализующих электрическую коммутацию между контактными площадками кристалла (подложки) и выводами корпуса традиционно используются Al и Au, что и определяет выбор типа сварки.

Склеивание

Клеевые соединения не требуют сложного оборудования, легко выполняются, но не всегда обеспечивают хорошее качество контакта. Этим объясняется их применение в основном для микросхем пониженных мощностей, работающих в нежестких условиях эксплуатации. Различают токонепроводящие и токопроводящие клеи. При отвердевании происходит усадка клея, механические напряжения, возникающие при этом, обеспечивают стягивание и плотное механическое соединение деталей.

Прочность клеевого соединения зависит от качества подготовки склеиваемых поверхностей, толщины клея, режима сушки, качества клея. Обязательна очистка поверхности перед склеиванием и сушка.

Количество дефектов в слое клея растёт с увеличением толщины, следовательно, прочность соединения падает. Оптимальный слой клея от 0,05 до 0,1 мм.

Для операций сборки используют клеи на основе эпоксидных смол, полиимида и других термо- и реактопластов.

8.5. Методы защиты кристаллов и подложек ИМС

Для предотвращения или понижения влияния на работоспособность и надежность ИМС механических и климатических воздействий осуществляют их защиту. В зависимости от конструктивно-технологического исполнения, назначения и областей применения используют корпусную или бескорпусную защиту.

При изготовлении полупроводниковых ИМС прибегают, как правило, к корпусной защите, но есть серии и бескорпусных микросхем.

Приведем: схему, описывающую виды корпусной защиты (рисунок 56).



Рисунок 56 – Виды корпусной защиты ИМС

Как и любая другая классификация приведенная выше весьма условна. Но в ней выделяются два основных варианта, подразумевающих степень защиты кристалла ИМС. Вакуум-плотная защита подразумевает, что кристалл или подложка полностью изолированы от внешних воздействий и внутрь корпуса ничто не может проникнуть. Такой вариант характерен для изделий специального назначения военных или аэрокосмических, что подразумевает высокие нагрузки и повышенные требования к надежности ИМС.

Негерметичная защита, говорит об относительно слабой изоляции, проницаемой для внешнего воздействия среды, например, влаги.

Вторым критерием классификации служит конструкционное исполнение корпусов. При этом вакуум-плотная защита достигается использованием металлостеклянных, металлокерамических, керамических и стеклянных корпусов. А негерметичная защита предполагает вариант использования в качестве материала корпуса пластмассы.

Третьим критерием классификации служат способы реализации операции корпусирования. При этом вакуум-плотная защита достигается только с применением сварки и пайки. А негерметичная защита может быть реализована вакуумной заливкой, литьевым прессованием и склеиванием.

Бескорпусная защита может быть выполнена путем заливки платы с компонентами, предварительно сформированными выводами, эластичными компаундами типа КТ-102, ВИКСИНТ и так далее, а также для полупроводниковых ИМС нанесением влагозащитных лаков и эмалей.

Корпусная защита обычно вполне эффективна, а бескорпусная используется в основном для компонентов ГИМС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все описанное выше применимо не только в микроэлектронике, но и в технологии любых других электронных элементов и компонентов. Даже если вы проектируете, например, мощный дискретный транзистор или диод, вам необходимо позаботиться об эффективном теплоотводе от активной зоны, что приведет к необходимости использования сильнолегированной подложки и припоя для посадки кристалла в корпус. Даже если вы задумаете поместить более двух элементов в один корпус, то есть изготовить микросборку, то вам придется задуматься об изоляции элементов друг от друга. Какой бы элемент вы не планировали изготовить и спроектировать, вам придется выстроить последовательность технологических операций, которая позволит реализовать ваш проект с минимальными затратами и с максимальной эффективностью. Инженерная работа сводится именно к поиску оптимальных путей решения технических проблем.

Переход от технологии микроэлектроники к технологии нанoeлектроники пока не привел к радикальному изменению списка технологических операций при формировании элементов электронной техники. По-прежнему востребованы маскирование, литография, и диффузия примеси, что приводит нас к необходимости не только смотреть на современные достижения электронной техники, но и интересоваться тем как были реализованы ранее изготовленные элементы, до сих пор использующиеся в РЭС.

Развитие нанотехнологий когда-нибудь приведет к прорыву в технологии ЭКБ. Но на данный момент такого прорыва не наблюдается. Самым существенным (с точки зрения технологии) направлением в нанoeлектронике я вижу проникновение в принципы самоорганизации структур. Природа давно решила эту задачу, но мы пока находимся в начале пути. Никакие другие техноло-

гические ухищрения (особенно в рамках парадигмы «сверху вниз») не изменяют (по крайней мере существенно) существующие технологические приемы формирования элементов. С течением времени мы – технологи снова упрямся в непреодолимый барьер, как это случилось с изготовлением традиционных процессоров в вычислительной технике. Пока с этим справляются изменением архитектуры самих процессоров, но дальнейшие шаги по совершенствованию и массовому использованию может быть связано только с радикальными изменениями в структуре. Что в свою очередь подразумевает переход на новую технологическую базу, которая не может быть реализована только путем усовершенствования имеющихся процессов. Именно массовость и доступность технологии – критерий успешности преобразований. Пока нет дешевых и относительно простых технологических решений управления структурой вещества на атомарном уровне нанотехнологии – это заимствование технологий из ранее существовавших научных разделов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сорокин В.С., Антипов Б.Л., Лазарева Н.П. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики: учебник. – 2-е изд., испр. – СПб.: Изд-во «Лань» 2015. – Т. 1. – 448 с.
2. Торгонский Л.А. Проектирование интегральных микросхем и микропроцессоров: учебное пособие. В 3-х разделах. – Томск: ТУСУР, 2011. – Раздел 2. – 228 с.
3. Воротынцев В.М., Скупов В.Д. Базовые технологии микро- и нанoeлектроники: учебное пособие. – М.: Изд-во «Проспект», 2017. – 439 с.
4. Коледов Л.А. Технологии и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок: учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Изд-во «Лань», 2007. – 400 с.
5. Дубровский В.Г. Теоретические основы технологии полупроводниковых наноструктур. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 225 с.
6. Вакуумная техника: учебник для вузов / Л.Н. Розанов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2007. – 391 с.
7. <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1165058>

Учебное издание

*Архипов Алексей Владимирович,
Советкина Мария Александровна*

**ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ
ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ**

Учебное пособие

Редакционно-издательская обработка А.В. Ярославцевой
Компьютерная вёрстка А.В. Ярославцевой

Подписано в печать 15.06.2022. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 12,0.

Тираж 25 экз. Заказ № . Арт. – 18(Р1У)/2022.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.