

С.А. Пивоваренок

Д.В. Ситанов

ПРОЦЕССЫ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

2016

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ивановский государственный химико-технологический университет

С.А. Пивоваренок, Д.В. Ситанов

ПРОЦЕССЫ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Учебное пособие

Иваново 2016

УДК 621.382

Пивоваренок, С. А. Процессы микро- и нанотехнологий: учебное пособие / С. А. Пивоваренок, Д. В. Ситанов; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2016. – 254 с.

Учебное пособие содержит подробное описание базовых процессов планарной технологии изготовления интегральных микросхем в микро- и наноэлектронике. Рассматриваются процессы очистки материалов, получение эпитаксиальных пленок на поверхности подложек, формирование защитных и пассивирующих покрытий, а также фотолитография, диффузия и изготовление печатных плат. Каждый раздел пособия содержит перечень вопросов для самоподготовки. С целью получения практических навыков и закрепления теоретического материала в пособие включены шесть базовых лабораторных работ по основным технологическим процессам.

Каждое описание лабораторной работы содержит подробное теоретическое введение, описание материалов и лабораторного оборудования, порядок выполнения работы и лабораторное задание.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки «Электроника и наноэлектроника» и «Химическая технология» при изучении дисциплины «Процессы микро- и нанотехнологий».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ивановского государственного химико-технологического университета.

Рецензенты:

кафедра коммерции, технологии и прикладной информатики Ивановского филиала Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова;
старший преподаватель Р. Н. Габитов (Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина).

© Пивоваренок С.А., Ситанов Д.В., 2016
© ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный химико-технологический
университет», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ОЧИСТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПОДЛОЖЕК	16
1.1. Основные определения и понятия.....	16
1.2. Жидкостная очистка.....	19
1.2.1. Обезжиривание в органических растворителях.....	19
1.2.2. Обезжиривание в активных средах.....	20
1.2.3. Травление как способ очистки пластин и полупроводниковых материалов	22
1.3. Сухая очистка	31
1.3.1. Термообработка.....	31
1.3.2. Ионное травление.....	31
1.3.3. Газовое травление	32
1.3.4. Плазмохимическое травление.....	33
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Очистка полупроводниковых подложек ...	33
Контрольные вопросы к разделу "Очистка полупроводниковых подложек"	37
2. ЭПИТАКСИЯ	39
2.1. Классификация эпитаксиальных процессов.....	42
2.2. Методы проведения эпитаксии	48
2.2.1. Газофазная эпитаксия	48
2.2.2. Эпитаксия из металлоорганических соединений	52
2.2.3. Молекулярно-пучковая (лучевая) эпитаксия	55
2.2.4. Жидкофазная эпитаксия	58
Контрольные вопросы к разделу "Эпитаксия"	60
3. ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ И ПАССИВИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ	60
3.1. Пиролитическое осаждение.....	61
3.2. Анодное окисление	64
3.3. Газофазное осаждение с применением плазменной стимуляции процесса осаждения	64
3.4. Высокотемпературное окисление кремния	66
3.4.1. Термическое окисление кремния в парах воды	66
3.4.2. Термическое окисление кремния в сухом кислороде	67
3.4.3. Термическое окисление кремния во влажном кислороде	68
3.4.4. Термическое окисление кремния при повышенном давлении и в галогеносодержащих средах.....	72
3.5. Факторы, влияющие на скорость роста пленки при	

окислении кремния.....	73
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Высокотемпературное окисление	
кремния.....	74
Контрольные вопросы к разделу "Процессы формирования защитных и пассивирующих покрытий"	84
4. ПРОЦЕССЫ СОЗДАНИЯ ТОПОЛОГИИ МИКРОРЕЛЬЕФА В ТЕХНОЛОГИИ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ	85
4.1. Позитивные и негативные фоторезисты	87
4.2. Свойства фоторезистов	88
4.3. Этапы операций фотолитографического цикла	92
4.4. Способы увеличения разрешающей способности фотолитографических процессов	108
4.5. Рентгенолитография.....	110
4.5.1. Маски для рентгенолитографии	113
4.6. Ионно-лучевая литография	114
4.7. Электролитография	115
4.7.1. Свойства электронорезистов.....	116
4.7.2. Характеристики промышленных электронорезистов	117
4.7.3. Шаблоны для ЭЛЛ	119
4.7.4. Механизмы и закономерности реализации электронно-лучевой литографии.....	119
4.8. Нанолитография оптического диапазона.....	121
4.8.1. Коррекция оптической близости	121
4.8.2. Введение искусственного фазового сдвига	122
4.8.3. Внеосевое освещение фотошаблона	124
4.8.4. Иммерсия	125
4.8.5. Двойное экспонирование и двойное паттернирование	125
4.8.6. Использование двухслойного резиста и силилирование	126
4.8.7. Взрывная фотолитография.....	127
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Фотолитография	130
Контрольные вопросы к разделу "Процессы создания топологии микрорельефа в технологии микро- и нанoeлектроники"	135
5. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИФФУЗИЯ ПРИМЕСИ В ОБЪЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПОДЛОЖКИ	136
5.1. Процессы, определяющие диффузию примесей.....	136
5.2. Виды и источники легирующих примесей	137
5.3. Уравнение диффузии	140
5.4. Диффузия из бесконечного источника примеси	142

5.5. Диффузия из ограниченного источника примеси	146
5.6. Диффузия из газовой фазы	148
5.7. Диффузия из жидкой фазы	148
5.8. Диффузия из твердой фазы	149
5.9. Диффузия в замкнутом объеме	149
5.10. Диффузия в потоке газа-носителя (диффузия по способу открытой трубы)	150
5.11. Физико-химическая сущность диффузионных процессов.....	153
5.12. Ионное внедрение примеси в полупроводник	155
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Высокотемпературная диффузия примеси в полупроводник	158
Контрольные вопросы к разделу "Высокотемпературная диффузия примеси в объем полупроводниковой подложки"	175
6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОДНОСТОРОННИХ И ДВУХСТОРОННИХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ	176
6.1. Основные определения и характеристики печатных плат.....	176
6.2. Методы создания рисунка проводников ПП	179
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. Изучение технологических операций и процессов изготовления ОПП и ДПП	184
Контрольные вопросы к разделу "Технологические процессы изготовления односторонних и двухсторонних печатных плат"	186
7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ	187
7.1. Основные определения и характеристики печатных плат.....	187
7.2. Технологии создания рисунка проводников на слоях МПП	192
7.2.1. Субтрактивная технология получения рисунка слоев МПП.....	193
7.2.2. Технология формирования проводящего рисунка слоев МПП методом ПАФОС	199
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. Изучение технологических операций и процессов изготовления МПП	203
Контрольные вопросы к разделу "Технологические процессы изготовления многослойных печатных плат"	206
Приложение 1. Определение толщины оксидной пленки методом цветовых оттенков Ньютона	208
Приложение 2. Основные материалы и операции, используемые при изготовлении печатных плат.....	212
Приложение 3. Технологические маршруты изготовления печатных плат	244
Список рекомендуемой литературы.....	244

ВВЕДЕНИЕ

Современная микроэлектроника (МЭ) – это область электроники, объединяющая комплекс физических, радиотехнических и технологических проблем, направленных на создание сложных электронных схем для хранения, переработки и передачи информации.

Основой современной МЭ являются твердотельные микросхемы, создаваемые на отдельном, как правило, кремниевом кристалле – чипе. Интегральная схема (ИС) может быть представлена как совокупность дискретных элементов, взаимодействующих между собой за счет созданных на чипе межсоединений. Каждый же функциональный элемент ИС характеризуется различающимися по своим характеристикам однородными областями. Минимально достижимые размеры (проектные нормы) этих областей и определяют условный тип технологии. Так для биполярной технологии за минимальный достижимый размер принимают толщину области базы транзистора, а для полевых ИС – длину канала транзистора. Таким образом, если говорят о проектных нормах 17 нм, то это означает, что длина канала транзистора (в униполярной технологии) или ширина его базы (в биполярной технологии) составляет 17 нм.

Элементы, из которых состоит ИС, могут быть охарактеризованы следующими параметрами:

- N – число активных элементов на чипе;
- τ – время переключения элемента между двумя электрическими (логическими) состояниями под действием сигнала;
- $\nu = 1/4\tau$ – тактовая частота;
- $N\nu$ – функциональное быстродействие (ФБ) схемы;
- P – мощность, рассеиваемая в процессе переключения элемента;
- $P\tau$ – показатель качества элемента, определяющий количество энергии, рассеиваемой элементом в единичном акте переключения;
- d – характерный размер активной области элемента (длина канала, ширина базы), который определяется разрешающей способностью технологического процесса.

Важнейшими характеристиками ИС с точки зрения потребителя являются: стоимость бита информации (C), то есть фактически стоимость одного элемента, и надежность работы ИС, определяемая вероятностью ее отказа.

В табл. 1 приведены характеристики ИС в динамике их развития до 2000 года.

Таблица 1

Характеристики ИС в динамике развития

Годы	1980 г.	2000 г.
N , элемент/чип	$10^4 - 10^5$	$3 \cdot 10^5 - 10^6$
τ , с	$10^{-5} - 10^{-6}$	$10^{-8} - 10^{-9}$
ν ,	10^5	$2,5 \cdot 10^7$
ФБ, элемент·Гц	$10^{10} - 10^{11}$	10^{13}
P , Вт	10^{-4}	10^{-5}
$P\tau$, Дж	$10^{-9} - 10^{-10}$	$10^{-13} - 10^{-14}$
C , доллар/бит	10^{-4}	10^{-5}
d , мкм	3,5	0,5

Из табл. 1 видно, что на рубеже нынешнего столетия прогресс в микроэлектронике достигается за счет уменьшения размеров элементов и соответствующего увеличения плотности их упаковки. Считалось, что улучшение операционных характеристик ИС за счет миниатюризации элементов и увеличения плотности их упаковки в несколько раз более эффективно, чем тот же эффект за счет усовершенствования схемотехники и увеличения размеров кристалла. Увеличение же числа элементов на кристалле, при практически неизменной его стоимости, сопровождается падением стоимости отдельного элемента. Именно в таком направлении развивалась вся электроника прошлого столетия. Это привело к тому, что в настоящее время среднестатистическими показателями микросхем являются следующие характеристики:

- характерный размер элемента ИС ~ 20-30 нанометров;
- более 10^8 транзисторов/см² для логических ИС;
- более 10^{10} бит/см² для ИС памяти;
- стоимость менее чем $2,7 \cdot 10^{-7}$ доллар/транзистор для логических ИС;
- стоимость менее чем $7 \cdot 10^{-9}$ доллар/бит для ИС памяти;
- рабочая частота ~ 13 ГГц;
- рассеиваемая мощность для $1,4 \cdot 10^9$ транзисторов микропроцессорных ИС менее 180 Вт.

Кроме того, диаметр пластин для планарной технологии достиг 450 мм, количество слоев межсоединений на кристалле достигло 10, а средняя стоимость завода по производству микросхем составляет примерно 5 млрд евро.

Таких колоссальных результатов микроэлектроника достигла, в том числе, благодаря известному высказыванию Гордона Мура, который в начале семидесятых годов прошлого столетия высказал предположение о возможных

темпах развития микроэлектроники. В частности, он предположил, что будет наблюдаться удвоение производительности ИС каждые 18 месяцев. Так, или каким-либо другим путем развивалась бы микроэлектроника, сейчас сказать трудно, но после того как в июле 1968 года Мур с Робертом Нойсоном основали корпорацию Intel, в которой Мур занимал вначале должность исполнительного вице-президента, а с 1975 года президента и главного исполнительного директора Intel, пока его в 1979 году не избрали председателем Совета директоров и главным исполнительным директором корпорации, бывшие прогнозы начальника инженерного отдела Fairchild Semiconductors, а теперь основателя Intel стали, что-то вроде бизнес плана развития корпорации, выполнение которого, как известно, обязательно для подчиненных. Так родился грандиозный миф, в последующем названный законом Мура. Однако интерес к тому, что называют сейчас законом Мура, был вызван не самим этим законом, а тем, что обычно называют следствиями из закона Мура. Сформулируем эти следствия, их всего два:

1. Был предсказан годовой экспоненциальный рост числа транзисторов, формируемых на полупроводниковом кристалле.
2. Было предсказано сначала постепенное, а затем колоссальное уменьшение себестоимости производства одного транзистора в составе готовой микросхемы. Это было особо важно для бизнеса, так как сулило огромные доходы от изначальных инвестиций в микроэлектронику. Поэтому микроэлектроника и стала развиваться экспоненциальными темпами, как это и предсказал Гордон Мур (рис. 1), подминая под себя все альтернативные направления электроники.

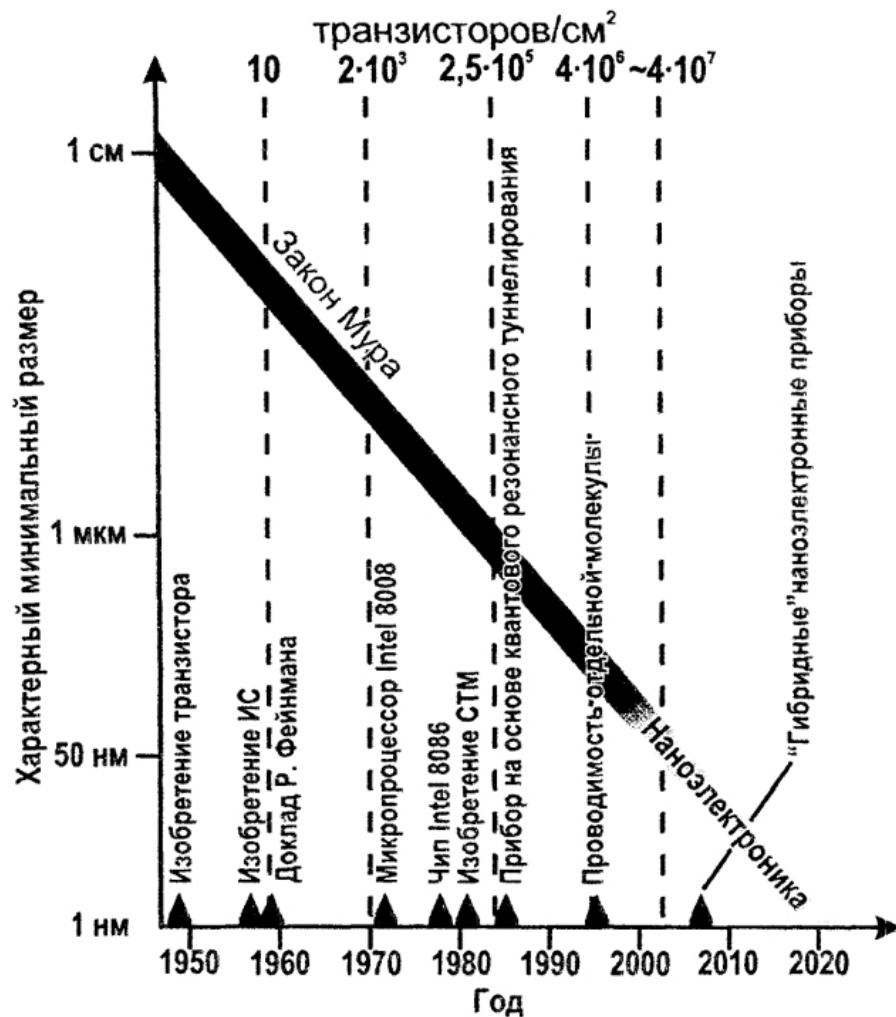


Рис. 1. Графическое изображение закона Мура

Интерес к феномену закона Мура в свое время был настолько велик, что его умудрялись связывать с наиболее важными открытиями в области физики и электроники (изобретение транзистора, доклад Р. Феймана в 1959 году в Калифорнийском технологическом институте, где представил свои знаменитые лекции по физике и предсказал появление нанoeлектроники, изобретение сканирующего туннельного микроскопа и т.д.).

А такие направления, безусловно, были и в первую очередь – это молекулярная электроника (МЭ), получившая свое начало в начале 40-х годов прошлого столетия в работах Мак Каллоха и Питтса, предлагавшие свою, отличную от фон Неймана с его бинаризацией, парадигму организации вычислительного процесса. Исходные принципы подхода Мак Каллоха и Питтса фундаментально отличаются от основных принципов парадигмы фон Неймана. Прежде всего – это очень высокий параллелизм, многократно повышающий производительность системы обработки информации, и нелинейные механизмы, которые приводят к тому, что система может выполнять весьма сложные логические операции в качестве

элементарных. Такой подход сулил высокие потребительские характеристики вычислительных машин и электроники в целом, однако он был специфичен, основывался на возможностях нейронных сетей и распределенных диффузионных сред, и что самое главное, был не эффективен для решения элементарных вычислительных задач, с которыми машины на основе фон Неймановской архитектуры справлялись более эффективно. Кроме того, электроника на основе биологических структур казалась в то время малонадежной (другой разговор монокристалл). Таким образом, в силу своей практической не востребоваемости подход Мак Каллоха и Питтса развивался в 50-60-е годы в основном теоретиками, уступая лидирующие позиции кремниевой электронике.

Практическая реализация нейросетевых устройств началась, в сущности, в 80-е годы и послужила началом создания нейрокомпьютеров. Естественным было и то, что в силу грандиозных успехов развития цифровых ЭВМ эти устройства создавались на основе зарекомендовавшей себя планарной полупроводниковой схемотехники и технологии. Тем не менее, несмотря на целый ряд интересных и практически важных разработанных устройств, нейрокомпьютеры не вышли еще на уровень распространения, сходный с цифровыми фон неймановскими компьютерами. В основе этого лежат технические трудности, практически не решаемые средствами планарной полупроводниковой технологии, а именно:

- практическая реализация высокого параллелизма, которая наталкивается на ультра большое количество межсоединений, очень трудно реализуемое в рамках изначально дискретной идеи;
- необходимость обучения нейронных сетей, чему мешает сложность реализации варьируемых весов нейронов. Мало того, дискретные фон неймановские устройства принципиально не способны к структурной адаптации и обучению. В то же время, нейросетевые устройства, по своей сущности, должны быть адаптивными, что реализуется переменными весами нейронов в модели Мак Каллоха и Питтса. И эта способность к адаптации должна быть, по-видимому, заложена в принципах материального воплощения нейронных сетей, отличных от дискретных. Поэтому в настоящее время и именно сейчас, когда возможности планарной технологии исчерпаны (в соответствии с тем же законом Мура, так как в результате миниатюризации размеры полупроводниковых устройств достигли нескольких сотен атомов, выстроенных в ряд) не прекращаются попытки найти принципиально новые идеи, которые позволили бы естественным образом воплотить концепцию нейронных сетей. Одно из таких направлений – использование принципов обработки информации распределенными молекулярными и простыми биологическими системами, рассматриваемые как направление молекулярной электроники.

Если рассуждать формально, то молекулярная электроника имеет ряд технологических особенностей по сравнению с полупроводниковой электроникой:

1. Конструкции схемотехнических элементов МЭ основываются на молекулярных структурах, реализуемых средствами «самосборки» в соответствии с представлениями о синтезе вещества в химической технологии.
2. Размерами молекулярных структур можно легко и эффективно управлять, изменяя среду окружения через изменение электрохимического потенциала на границе гетероструктуры.
3. Молекулярные диоды, транзисторы, компьютерная память (ПЗУ, ОЗУ) и др. получают в окружающей среде, не требующей высокой степени чистоты, следовательно, уменьшаются затраты на поддержание производственной гигиены.
4. Белковые молекулярные структуры могут работать только в ограниченном интервале температур.

Молекулярная электроника вплотную приближает нас к идеям наноэлектроники, которая, по сути, абстрагируется от конкретного материала, из которого сделан электронный прибор, и описывает электропроводность радиоэлемента как квантово-размерной структуры. Ранее считалось, что наноструктура отличается от макрообъекта исключительно размером (обычно приводились цифры 100 или 70 нм). Позднее стало ясно, что размер – это лишь часть и зачастую не главная при описании свойств наноматериалов. Наиболее удачное определение наноматериалов и нанотехнологии дал академик Ж. И. Алферов в журнале «Микросистемная техника»: «Если при уменьшении объема какого-либо вещества по одной, двум или трем координатам до размеров нанометрового масштаба возникает новое качество, или это качество возникает в композиции из таких объектов, то эти образования следует отнести к наноматериалам, а технологии их получения и дальнейшую работу с ними – к нанотехнологиям». Это определение позволяет сформулировать основные отличительные особенности наноматериалов и нанотехнологии, как средства их получения:

1. Появление новых свойств у наноразмерных материалов по сравнению с этим же материалом в микро- и макроформе.
2. Принцип самоорганизации и сборки при их технологическом получении.
3. Принцип морфологического многообразия форм вещества в наноформе, которые будут отличаться специфическими физическими и химическими свойствами.
4. Необходимость использования междисциплинарного подхода для описания свойств и характеристик материалов в наноформе.

Как ни странно, но закон Мура предсказал появление нанотехнологии и наноэлектроники, в частности (правда здесь нужно и должно в первую очередь говорить о работах таких величайших физиков теоретиков, как Ричард Филипс Фейман (1918-1988), Вернер Карл Гейзенберг (1901-1976), Эрвин Рудольф Йозеф Александр Шрёдингер (1887-1961), Макс Карл Эрнест Людвиг Планк (1858-1958), Нилс Хендрик Давид Бор (1885-1965), Поль Адриен Морис Дирак (1902-1984), Энрико Ферми (1901-1954) и др.).

Тем не менее, планарная полупроводниковая технология, как заявляют представители корпорации Intel, останется актуальной как минимум до 2050 года и в любом случае для достижения высокой степени интеграции необходимо будет:

- уметь создавать элементы достаточно малых размеров;
- добиваться нормального функционирования каждого отдельного элемента;
- добиваться нормального функционирования всех элементов в составе ИС.

При этом возможные ограничения на размеры элементов можно разбить на три группы:

1. Физические ограничения, возникающие в технологии производства ИС (ограничения, связанные с рассеянием экспонирующего луча при литографии, флуктуации легирующих примесей, получение однородности и минимальных размеров при использовании пучковых технологий и т. п.).
2. Физические ограничения работоспособности отдельных элементов (ограничения, обусловленные смыканием *p-n* переходов, пробоем сверхтонких диэлектрических слоев, разогревом носителей и т. п.).
3. Физические ограничения на степень интеграции элементов и размеры элементов, связанные с взаимодействием их друг с другом.

Целью данного курса является изучение базовых процессов планарной технологии и возможных путей устранения их ограничений при переходе на сверхмалые размеры формируемых структур.

Планарная технология

Планарная технология (от англ. *Planar* – плоский, ровный) – совокупность способов изготовления полупроводниковых приборов и полупроводниковых интегральных схем путем формирования их структур с одной (рабочей) стороны полупроводниковой пластины (подложки).

Планарная технология основывается на создании в приповерхностном

слое полупроводниковой монокристаллической пластины областей с различным типом проводимости или с разной концентрацией примесей, в совокупности образующих структуру полупроводникового прибора или ИС. Такие области создаются локальным введением в подложку примесей (посредством диффузии или ионного легирования), осуществляемым через маску (обычно из пленок оксида или нитрида кремния), маскирующие свойства которой обусловлены тем, что скорость диффузии большинства примесей в ней существенно ниже, чем в полупроводнике.

Последовательно проводя процессы окисления (образования маскирующей пленки), литографии (создания маски) и введения примесей (диффузии или ионного внедрения), можно получить в приповерхностном слое подложки области любой требуемой конфигурации, а также создать внутри области с одним типом проводимости область с другим типом проводимости или с отличающимся уровнем концентрации примеси.

Все эти области имеют выход на одну сторону подложки, что позволяет через окна в защитном слое осуществить их коммутацию в соответствии с заданной схемой при помощи пленочных металлических (Al или Cu) проводников, нужная конфигурация которых также обеспечивается методом литографии. Пленка диэлектрика, помимо использования ее в качестве маски, защищает выходящие на поверхность *p-n* переходы как в процессе их формирования, так и при эксплуатации полупроводниковых приборов и ИС.

В настоящее время известно более 1000 вариантов планарной технологии, каждая из которых состоит из сотен технологических операций, очередность которых, строго регламентирована технологическим маршрутом. В зависимости от характера воздействия на используемые материалы, цели операции и конечного результата все процессы планарной технологии можно условно разделить на 8 групп:

1. Удаление материала (механическая, химическая, плазмохимическая обработка подложек; ионное травление; очистка материалов).
2. Нанесение материала (создание диэлектрических и металлических пленок на подложках, эпитаксиальное наращивание полупроводникового материала).
3. Формирование топологии пленочных элементов (литография, электронное фрезерование и пр.).
4. Формирование в подложке областей с различными электрофизическими характеристиками (диффузионное или ионное легирование подложек, а также получение пленок поликристаллического кремния, слоев SiO₂,

Si_3N_4 , SiC и т.д.).

5. Термообработка для придания необходимых свойств материалам и элементам конструкции изделий микроэлектроники (отжиг пленок для снятия внутренних напряжений, вжигание контактов, активирующий отжиг после ионного легирования, разгонка примеси).
6. Соединение материалов (сварка, пайка, сборка, герметизация корпусов и пр.).
7. Контрольные и подгоночные операции (измерение электрофизических параметров материалов и структур до и после их обработки, контроль геометрических размеров и параметров изделий, общий контроль дискретных полупроводниковых приборов и ИС на соответствие требованиям и т.д.).
8. Вспомогательные операции (маркировка изделий, комплектация партии подложек, упаковка готовых изделий, межоперационная транспортировка, подготовка сырья и материалов, мероприятия по поддержанию производственной гигиены).

Порядок прохождения практикума

Лабораторный практикум выполняется в соответствии с графиком и календарным планом, которые составляются на каждый учебный год. С содержанием и планом прохождения практикума, требованиями к выполнению работ и оформлению отчетов студенты знакомятся на первом вводном занятии. На этом же занятии проводится инструктаж по технике безопасности при работе в дисплейном классе, и выдаются задания на выполнение первой лабораторной работы.

Лабораторные работы выполняются индивидуально.

В конце занятия студент должен получить индивидуальное задание для подготовки к очередной лабораторной работе.

Подготовка к выполнению лабораторной работы включает в себя:

- изучение теоретического материала по краткому теоретическому введению, конспектам лекций и учебной литературе, указанной в конце практикума;
- определение всех расчетных величин и процедур, необходимых для дальнейших расчетов с целью достижения конечной цели работы.

Перед каждой работой студент проходит краткое собеседование с преподавателем для выяснения уровня готовности к выполнению задачи.

Результаты собеседования учитываются при выставлении оценки за выполнение работы.

Общие требования к оформлению отчетов по лабораторным работам

1. Отчет оформляется на отдельных чистых листах бумаги, скрепленных между собой.
2. Отчет должен содержать титульный лист с указанием даты выполнения лабораторной работы, темы лабораторной работы, основного исполнителя и преподавателя, выдавшего задание, а также даты сдачи лабораторной работы в соответствии с графиком выполнения лабораторных работ.
3. Основная часть отчета должна содержать:
 - небольшое теоретическое введение (1, 2 листа текста), самостоятельно сформулированное и оформленное обучающимся, отражающее суть и цели лабораторной работы (копирование текста не допускается);
 - основные результаты, сведенные в таблицы или представленные в виде графического материала;
 - выводы по лабораторной работе.

1. ОЧИСТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПОДЛОЖЕК

1.1. Основные определения и понятия

Интегральная и функциональная микроэлектроника являются фундаментальной базой развития всех современных систем радиоэлектронной аппаратуры. Они позволяют создавать новый вид аппаратуры – интегральные радиоэлектронные устройства. Микроэлектроника – одно из основных направлений в радиоэлектронике, и уровень ее развития в значительной степени определяет уровень научно-технического прогресса страны.

В технологии очистке подвергаются:

1. **Подложки**, под которыми понимают твердые материалы, обычно в виде пластин, на поверхности или в приповерхностном объеме которых создаются гомо- или гетероструктуры. Практически всегда целью очистки подложек является удаление с ее поверхности **механических загрязнений** (пыли, остатков абразивных материалов, шлифовальных паст, остатков органических материалов, например, резиста); **физически и химически адсорбированных веществ** (это могут быть любые химические реактивы, используемые для травления или модификации поверхности подложки: кислоты, щелочи, соли, остатки жирных растворителей). Так как многие химические реактивы сами используются для первичной очистки поверхности подложек, то важным процессом в операциях очистки является освежение подложек (их отмывка) в дистиллированной воде, бидистилляте или деионизованной воде. Первые два типа отмывочных сред получают методом дистилляции, деионизованную воду – методом обратного осмоса. Трудозатраты на производство деионизованной воды намного выше, поэтому она применяется для целей очистки только перед проведением основных технологических процессов, таких как диффузия, эпитаксия и ионная имплантация; **остатков металлов** (они наиболее часто попадают на подложки из оснастки и конструкционных элементов промышленных реакторов). Очень важно очистить подложки от следов металлов, так как последние, подпадая в приповерхностные слои подложки, ионизируются и выступают в качестве центров безызлучательной рекомбинации носителей зарядов в полупроводнике; **следов источников легирующей примеси**, оставшейся от предыдущих операций обработки полупроводниковых пластин; **естественных окислов на поверхности полупроводниковых материалов**. Известно, что кремний при контакте с воздухом мгновенно покрывается естественным слоем окисла, который, с одной стороны, не может быть использован в технологических целях

ввиду своей малой толщины, а с другой стороны мешает созданию на подложках из кремния топологических слоев; **остатков воды**. Вода является важным отмывочным и химическим реагентом в технологии микроэлектроники, поэтому, как и любое химическое соединение, вода способна адсорбироваться на поверхности подложки, мешая дальнейшим сухим процессам обработки подложек.

2. **Технологические газы и реактивы**. На предприятиях радиоэлектронного профиля вопросами очистки, регенерации и поддержания чистоты технологических газов и реактивов занимаются цеха химической подготовки. На технологический процесс производства чипов эти компоненты поступают как готовое сырье.
3. **Реакторы, подложкодержатели (лодочки), элементы оснастки, оборудование, чистые комнаты, воздух рабочей зоны**. Последнее, в частности, относится к процессам поддержания производственной гигиены, изучаемой в смежных курсах. Однако следует отметить, что чистота технологического производства микросхем и электронных чипов является комплексной задачей, решение которой для каждого из вышеперечисленных составляющих важна и влияет на качество конечного продукта.

Дадим наиболее важные определения относительно микроэлектронного производства.

Подложка – заготовка, предназначенная для формирования в ее объеме или на поверхности элементов интегральных, гибридных или пленочных микросхем, межэлементных и (или) межкомпонентных соединений, а также контактных площадок.

Подложки могут выполнять следующие функции:

- а) являются основанием, на поверхности или в приповерхностном слое которого по заданному топологическому рисунку формируют структуры микросхемы;
- б) являются элементом конструкции, обеспечивающим практическое применение интегральных микросхем (ИМС), пленочных микросхем (ПМС) или гибридных микросхем (ГМС) в корпусном или бескорпусном исполнении.

Для изготовления полупроводниковых ИМС в качестве подложек используют в основном монокристаллические полупроводниковые пластины элементарных полупроводников (кремния, германия) и ложных полупроводников (арсенида галлия, фосфида индия и т.д.), для производства

ПМС и ГМС используют аморфные, поликристаллические, диэлектрические, керамические подложки, а также на гибких полимерных структурах.

Полупроводниковая пластина – заготовка из полупроводникового материала, используемая для изготовления полупроводниковых ИМС. Полупроводниковые пластины получают из полупроводниковых слитков, механически разделяя их после калибровки на полупроводниковые шайбы, с последующим шлифованием, полированием и утонением (при необходимости). На технологический процесс, как правило, поступают тонкие полупроводниковые пластины, полностью подготовленные для технологического использования.

Полупроводниковый кристалл – часть полупроводниковой пластины, полученной методом скрайбирования (механического разделения на кристаллы) или лазерной резки. Полупроводниковый кристалл (или микроэлектронный чип), как правило, совпадает с геометрическими размерами микросхемы без учета ее выводов и корпуса.

Для того чтобы правильно выбрать тот или иной метод очистки, необходимо знать источник и виды загрязнений. Как было сказано ранее, источниками загрязнения могут быть последствия предыдущих технологических операций обработки пластин, технологические газы и среды, технологическое оборудование, остатки абразивных материалов, шлифовальных паст, резисты и сам оператор (технолог).

Состояние поверхности полупроводниковых пластин после их механической обработки можно охарактеризовать следующим образом: на поверхности полупроводника всегда остаются царапины, трещины, микронеровности. Этот слой называется **механически нарушенным**, а его толщина может достигать 10-20 мкм. Кроме того, под действием давления и перемещения пластин по шлифовальному кругу в более глубоких слоях материала возникают остаточные напряжения. Они еще не вызывают образования трещин, но приводят к некоторому нарушению кристаллической решетки. Этот слой получил название **физически нарушенного**, и его толщина обычно составляет 5-10 мкм. Нарушенный приповерхностный слой, образующийся вследствие механической обработки, можно удалить лишь на операциях жидкостного полирующего травления.

Обработанная кремниевая пластина имеет на поверхности большое количество нескомпенсированных (ненасыщенных) связей, что определяет её высокие адсорбционные свойства по отношению к различным загрязнениям. Последнее обуславливает необходимость периодической (пооперационной) очистки поверхности полупроводниковых пластин и подложек.

Для определения пределов очистки подложек и материалов вводится понятие **технологически чистой поверхности**, т.е. это такая поверхность, на которой присутствующие примеси не препятствуют воспроизводимому получению

заданных значений параметров приборов и ИМС и их стабильности во времени. Обычно допустимая концентрация примесей не должна превышать 10^{-6} г/см².

Для удаления загрязнений с поверхности пластин и материалов используют жидкостные и сухие процессы, которые, в свою очередь, классифицируются по механизму протекания на физические и химические (рис. 2).

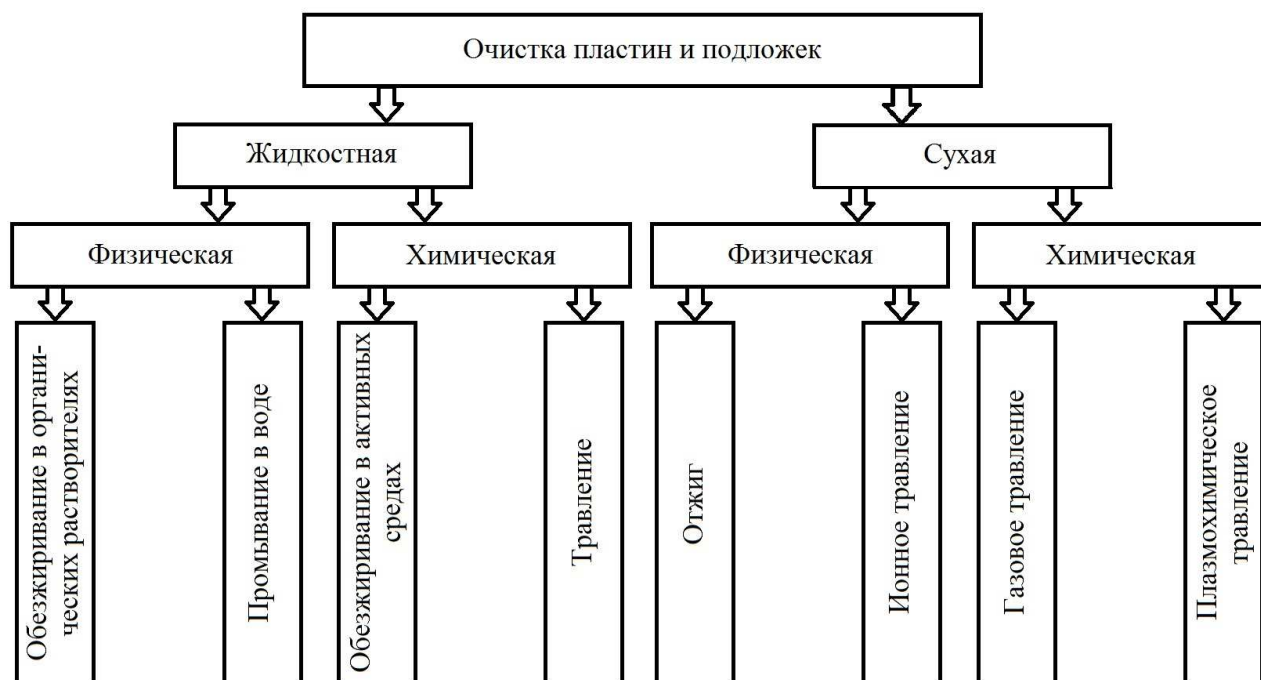


Рис. 2. Классификация методов очистки по физико-химическим особенностям

1.2. Жидкостная очистка

1.2.1. Обезжиривание в органических растворителях

Процесс основан на удалении с поверхностей молекул жиров, остатков силиконов и органики при их взаимодействии с горячими органическими растворителями (диметилкетон, метилциклогексан, втор-бутилацетат). При этом молекулы не разрушаются, а распределяются по всему объему отмывочных ванн. Необходимо постоянно регенерировать растворитель или добавлять новые его порции, чтобы избежать повторной адсорбции загрязнений на очищенную поверхность. Скорость процесса зависит от температуры и времени обработки. Такая очистка высокоэффективна, но многостадийна, требует большого расхода растворителей, дорогостоящая и в большинстве случаев токсична.

1.2.2. Обезжиривание в активных средах

Процесс основан на химическом разрушении молекул жира или других загрязнений обычно горячим (75-80°C) перекисно-аммиачным раствором (ПАР) $H_2O_2+NH_4OH$. Выделяющийся в результате разложения перекиси водорода атомарный кислород обладает высокой окислительной способностью по отношению к органическим (жиры, масла, силиконы) и некоторым неорганическим загрязнениям.

Иногда очистку поверхности пластин от жиров выполняют в мыльных растворах или в растворах поверхностно-активных веществ (ПАВ), используя, например, водные растворы синтанола.

В промышленности очистка на основе активных сред ведется в установках ванной отмывки или в автоматизированных кислотных процессорах, реализуя при этом принцип спреевой отмывки. В качестве рабочих жидкостей помимо перекисно-аммиачного раствора (ПАР) используют также кислотные растворы, например, H_2O_2+HCl и $H_2O_2+H_2SO_4$ и так называемый буферный раствор ($HF+NH_4F$).

Кислотные автоматизированные процессоры весьма эффективны, используются как на этапах финишной отмывки для большинства технологических операций, так и для целей межоперационных отмывок. Перед особо ответственными операциями планарной технологии (например, перед ионной имплантацией или диффузией примеси) после многостадийной очистки в активных средах обычно применяют отмывку в горячей деионизованной воде с озоном. Нагретая деионизованная вода с озоном по своим окислительным свойствам сравнима с горячей H_2SO_4 , поэтому на производстве она часто является заменой серной кислоты, например, для удаления с поверхности подложек полимерных слоев фоторезиста.

Отличительной особенностью обработки в активных средах является отсутствие вероятности повторного загрязнения пластин, а также низкая токсичность процесса.

Особенностью современного производства микро- и нанотехнологических электронных устройств является постепенный переход на более экономичные, малозатратные и эффективные технологические процессы. В частности, к таковым относится и процесс спреевой отмывки, в отличие от процессов, реализуемых в системах ванной отмывки.

Особенности процесса спреевой отмывки и возможный экономический эффект от его использования:

- рециркуляция растворов с целью повышения чистоты и экономии реактивов;
- использование инфракрасного нагревателя для растворов – существенно экономит расход электроэнергии;

- генератор озона в составе установки кислотного процессора позволяет заменить H_2SO_4 на деионизованную воду с O_3 , что приводит к экономии химикатов;
- более быстрый технологический процесс приводит к экономии электроэнергии;
- применение термостатированного химического контейнера приводит к меньшим потерям тепла на производстве.

Кроме того, в установках спреевой отмывки всегда используются свежие химические реактивы, у кислотного процессора решена проблема сушки (в комплекте имеется центрифуга, а для отмывки в ваннах необходимо докупать новое оборудование). Кроме того, в случае спреевой отмывки переход к другим габаритам пластин будет связан с меньшими финансовыми затратами (для установки ванной отмывки необходима будет закупка другой линии, а для кислотного процессора необходимо будет только заменить вращающийся столик – «*turntable*»). Сравнение экономических показателей установок ванной отмывки и кондиционирования поверхности приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение установки ванной отмывки и установки кондиционирования поверхности (КП)

Установка ванной отмывки	Кислотный процессор (спреевая отмывка)
Г а б а р и т ы:	
4500 x 1300 x 2000 мм	2060 x 1020 x 880 мм
П р о и з в о д с т в е н н ы й в е с:	
1350 кг	580 кг
З а н и м а е м а я п л о щ а д ь:	
5,8 м ²	2,1 м ²
П р о и з в о д и т е л ь н о с т ь:	
190 пластин/час	300 пластин/час
Р а с х о д H_2O_2 д л я 1 п л а с т и н ы:	
29,6 мл	5,77 мл
Р а с х о д HF д л я 1 п л а с т и н ы:	
14,4 мл	1,66 мл
Р а с х о д д е и о н и з о в а н н о й в о д ы д л я 1 п л а с т и н ы	
141 мл	4,01 мл

1.2.3. Травление как способ очистки пластин и полупроводниковых материалов

Травление полупроводников – это процесс, основанный на удалении приповерхностного слоя материала, в данном случае с имеющимися на поверхности загрязнениями, под действием химических реагентов или травителей. Однокомпонентные травители, такие как щелочи, кислоты и их соли в технологии используют редко. В основном применяют травящие составы, включающие в себя несколько компонентов.

Кинетика процесса травления состоит из нескольких этапов:

- диффузии реагента к поверхности из основного потока травителя;
- адсорбции реагента на поверхности;
- поверхностной химической реакции;
- десорбции продуктов реакции;
- диффузии продуктов реакции от поверхности и их удаление с потоком травителя.

Различают *химическое* и *электрохимическое* травление полупроводников. Согласно химической теории поверхностные химические реакции при травлении протекают в два этапа: окисление поверхностного слоя и перевод оксида в растворимую соль.

Химическое жидкостное травление в зависимости от лимитирующей стадии процесса можно разделить на несколько видов.

Если в процессе травления самой медленной (лимитирующей) стадией является диффузия окислителя к поверхности обрабатываемого материала, то говорят о *полирующем* травлении, а сам травящий состав называют полирующим. Обработка в таких травителях практически не зависит от изменения температуры, а определяется вязкостью среды и интенсивностью перемешивания. При таких условиях выступы на поверхности пластин травятся быстрее впадин, таким образом, происходит сглаживание шероховатости и выравнивается микрорельеф. Для германия и кремния полирующими травителями являются составы на основе азотной и плавиковой кислот.

Если в процессе травления лимитирующей стадией является химическая реакция, то это *селективное* травление. Селективными травителями для полупроводников будут составы на основе щелочей (NaOH или KOH). При этом скорость травления определяется температурой, типом материала и кристаллографической ориентацией поверхности пластин.

Селективные травители, значительно отличающиеся скоростями травления по разным кристаллографическим направлениям, называют *анизотропными*. Однако следует помнить, что по отношению к масочному травлению полупроводников жидкостное травление всегда *изотропно*, то есть всегда будет

наблюдаться подтрав под маску, вызванный почти одинаковыми скоростями травления в двух взаимно перпендикулярных направлениях, в отличие, скажем, от плазмохимического или ионного травления.

Электрохимическое травление является разновидностью обработки в активных средах и основано на химических превращениях, происходящих под действием электрического тока. Основой процесса являются реакции анодного окисления (растворения) и катодного восстановления. Травление производят в растворах, содержащих HF, при возрастающей плотности тока. Такое травление называют также *электрополировкой*.

Любой травильный раствор для кремния или германия должен содержать в своем составе в качестве обязательных компонентов какой-либо сильный окислитель, переводящий полупроводник в окисленное состояние и растворитель (комплексообразователь), переводящий окисел в раствор. В качестве окислителя чаще всего используются: азотная кислота, серная кислота, перекись водорода, а также некоторые соли, например, $K_2Cr_2O_7$, $KMnO_4$. Наиболее подходящими комплексообразователями являются кислоты – плавиковая (HF), соляная (HCl) и щелочи – NaOH, KOH.

Кроме этих обязательных компонентов, в травильном растворе могут присутствовать и другие составляющие. В частности, для ускорения процесса вводятся: I_2 , Br_2 и HBr , для регулирования скорости травления используются замедлители реакции – вода, уксусная кислота (CH_3COOH).

Таким образом, состав травителя для кремния и германия в общем случае должен состоять из следующих компонентов:

- окислителя;
- комплексообразователя;
- катализатора (ускорителя процесса);
- стабилизатора реакции (буфера или замедлителя).

В зависимости от условий травления и требований к качеству поверхности материала выбирают то или иное сочетание компонентов в травильном растворе.

Химическое травление кремния

Химическая инертность кремния на воздухе объясняется наличием на пластине оксидной пленки, которая растворима только в водных растворах щелочей или плавиковой кислоты. Поэтому для химической обработки кремния используют два вида травителей: *кислотный* и *щелочной*.

В качестве кислотных травителей применяют различные смеси азотной и плавиковой кислот:

- первая стадия: окисление кремния $3\text{Si} + 4\text{HNO}_3 = 3\text{SiO}_2 + 4\text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$;
- вторая стадия: травление окиси кремния $\text{SiO}_2 + 6\text{HF} = \text{H}_2\text{SiF}_6 + \text{H}_2\text{O}$.

Полное уравнение реакции травления кремния в смеси HF и HNO₃ можно записать так: $3\text{Si} + 4\text{HNO}_3 + 18\text{HF} = 3\text{H}_2\text{SiF}_6 + 4\text{NO} + 8\text{H}_2\text{O}$.

Максимальная скорость травления наблюдается, когда соотношение HF:HNO₃ в растворе в мольных долях равняется 1:4. Для получения воспроизводимых результатов необходимо интенсивное перемешивание травителя и поддержание постоянной температуры.

Типичный щелочной травитель представляет собой 30% раствор NaOH или KOH при температуре 50-100°C, время обработки 1-5 мин. Щелочной травитель часто используют для масочного травления, т.е. в тех случаях, когда требуется вытравить на поверхности подложки ямку определенной формы. Особый интерес представляют ямки V-образной формы, широко используемые для изоляции отдельных областей ИМС и получаемые в результате селективного изотропного травления.

Для щелочного травления можно записать:

- первая стадия: окисление кремния $\text{Si} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$;
- вторая стадия: травление окиси кремния $\text{SiO}_2 + 2\text{KOH} = \text{K}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O}$.

Полное уравнение реакции травления кремния в водном растворе KOH можно записать так: $\text{Si} + 2\text{KOH} + \text{H}_2\text{O} = \text{K}_2\text{SiO}_3 + 2\text{H}_2$.

Химическое травление германия

Для химического травления германия используют различные по составу травители. Основными травителями для германия являются азотная и плавиковая кислоты, а также перекись водорода.

В качестве кислотных травителей применяют смеси азотной и плавиковой кислот:

- первая стадия: окисление германия $\text{Ge} + 4\text{HNO}_3 = \text{GeO}_2 + 4\text{NO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$;
- вторая стадия: травление окиси германия $\text{GeO}_2 + 6\text{HF} = \text{H}_2\text{GeF}_6 + 2\text{H}_2\text{O}$.

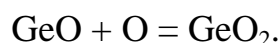
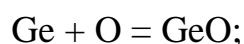
Полное уравнение реакции травления германия в смеси HF и HNO₃

можно записать так: $3\text{Ge} + 4\text{HNO}_3 + 18\text{HF} = 3\text{H}_2\text{GeF}_6 + 4\text{NO} + 8\text{H}_2\text{O}$.

Процесс травления в этой смеси имеет индукционный период, когда скорость процесса очень маленькая. Время индукционного периода можно сократить, если добавить в травитель небольшое количество таких катализаторов, как N_2O_4 (N_2O_4 – это по сути ассоциат молекулы NO_2 , который образуется при нормальных условиях) или NaNO_2 (нитрит натрия).

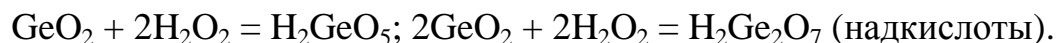
Часто в качестве полирующих травителей для германия используются растворы, содержащие HF и H_2O_2 . В качестве замедлителя реакции при этом используется вода, однако нужно иметь в виду, что при большом содержании воды травитель приобретает селективные свойства.

Процесс растворения германия в H_2O_2 состоит из двух этапов – окисление Ge до GeO_2 и растворения полученной двуокиси в воде. При этом на стадии окисления протекают следующие процессы:



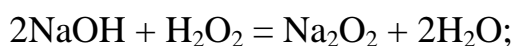
Поскольку скорость последующего растворения в воде GeO_2 больше, чем GeO , конечным продуктом реакции окисления считается GeO_2 . В зависимости от концентрации H_2O_2 скорость растворения Ge проходит через максимум и достигает своего максимального значения примерно при 4% H_2O_2 .

Второй этап процесса травления германия сопровождается реакциями:

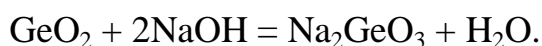


Травление германия в H_2O_2 имеет то преимущество, что в процессе разложения перекиси водорода образуется вода, а следовательно, не возникает дополнительных загрязнений ни растворителя, ни поверхности пластин. Нужно иметь в виду, что H_2O_2 является селективным травителем, то есть скорость растворения германия в плоскости (111) меньше, чем в плоскостях (110) и (100).

Для увеличения скорости травления германия в раствор можно добавлять немного щелочи. Она, во-первых, способствуют ускоренному разложению H_2O_2 :



и, во-вторых, образует с GeO_2 легко растворимое в воде соединение:



Примеры промышленных травителей для кремния

Существует много рецептов травителей, пригодных для различных целей. В табл. 3 приведены несколько широко применяемых составов для обработки кремния:

Таблица 3

Составы травителей для кремния

Номер п/п	Состав травителя	Характеристика травителя
1	2	3
1	$\text{HNO}_3:\text{HF} = 3:1$	Полирующий травитель. Температура процесса не более 30-40°C.
2	$\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH} = 3:1:9$	Применяется для травления по любым кристаллографическим плоскостям. Температура процесса не более 25°C.
3	$\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH} = 5:3:3$	Используется для медленного химического полирования Si, а также для выявления дислокаций.
4	$\text{KOH} (\text{NaOH}) + \text{H}_2\text{O} = 3:7$	Анизотропный травитель. Применяется для получения на поверхности подложки лунки определенной формы. Температура процесса 50-100°C.
5	20 мл HNO_3 + 30 мл HF + 10 мл H_2O + 1 г $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	Применяется для быстрой оценки плотности дислокаций по ямкам травления на всех кристаллографических плоскостях.

1	2	3
6	50 мл разбавленного (до 10%) раствора $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ + 2-3 капли HF (конц.)	Используется для выявления границы <i>p-n</i> перехода в кристалле методом химического декорирования. Медь осаждается на участок Si с электронным типом проводимости.
7	15 г CrO_3 + 35 мл H_2O + 15 мл HF (49%)	Применяется для выявления дислокаций.

Примечание. Для приготовления травильных смесей используются кислоты: азотная 65-70%, плавиковая 40-49%, уксусная – ледяная.

Любая химическая обработка поверхности подложек должна сопровождаться их последующей отмывкой в дистиллированной, бидистиллированной или деионизованной воде с обязательной сушкой. Промывка обязательна после обезжиривания и травления. Назначение отмывки – удаление остатков загрязнений, продуктов реакций и остатков реагентов.

Интенсификация процессов очистки

Для ускорения наименее медленных стадий процессов очистки и с целью повышения ее качества и производительности применяют различные способы ее интенсификации, которые достигаются применением физических, химических и комбинированных способов.

К физическим средствам относятся: нагрев, кипячение, вибрация, обработка струей, барботаж, циркуляция, центрифугирование, ультразвуковая обработка, плазменное воздействие.

К химическим средствам относятся: обработка поверхностно-активными веществами, использование комплексообразователей и катализаторов.

Комбинированные средства основаны на использовании физических и химических средств.

Применение этих средств позволило разработать наиболее эффективные способы обезжиривания, травления, промывки, а также высокопроизводительное оборудование. Наиболее распространенными и эффективными способами жидкостной обработки в промышленных условиях являются ультразвуковая очистка в растворителях, химико-динамическое и анодно-механическое травление.

Стандартные концентрации химических реагентов, используемые в микроэлектронной промышленности, приведены в табл. 4, а травящие составы для диэлектрических материалов и металлов с процессами травления показаны в табл. 5.

Таблица 4

Химические реагенты, используемые в микроэлектронной промышленности

Соединение	Химическая формула	Стандартная концентрация, %
Уксусная кислота	CH ₃ COOH	36
Фторид аммония	NH ₄ F	40
Ледяная уксусная кислота	CH ₃ COOH	99,5
Соляная кислота	HCl	36
Плавиковая кислота	HF	49
Азотная кислота	HNO ₃	67
Ортофосфорная кислота	H ₃ PO ₄	85
Гидроксид калия	KOH	50 или 10
Гидроксид натрия	NaOH	50 или 10
Серная кислота	H ₂ SO ₄	96

Таблица 5

Травящие составы для материалов микроэлектроники

Материал	Травитель
1	2
Диоксид кремния (SiO ₂)	1. Травление с помощью «ВОЕ» – буферного раствора плавиковой кислоты и фторида аммония. 2. «ВОЕ», этиленгликоль, монометилловый эфир. 3. Плавиковая и азотная кислота.
	$\text{SiO}_2 + 6\text{HF}(\text{жид.}) = \text{H}_2\text{SiF}_6 + 2\text{H}_2\text{O}; \text{H}_2\text{SiF}_6 + 2\text{NH}_4\text{F} = (\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6 + 2\text{HF};$ $\text{SiO}_2 + 4\text{HF}(\text{газ}) = \text{SiF}_4\uparrow + 2\text{H}_2\text{O}.$
Нитрид кремния (Si ₃ N ₄)	Плавиковая кислота и ортофосфорная кислота
	$\text{Si}_3\text{N}_4 + 16\text{HF}(\text{гор.}) = 2(\text{NH}_4)\text{SiF}_6 + \text{SiF}_4;$ $\text{Si}_3\text{N}_4 + 4\text{H}_3\text{PO}_4 + 10\text{H}_2\text{O} = \text{Si}_3\text{O}_2(\text{OH})_8 + 4\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4;$ $\text{Si}_3\text{O}_2(\text{OH})_8 = \text{SiO}_2 + 4\text{H}_2\text{O};$ $\text{SiO}_2 + 6\text{HF} = \text{H}_2\text{SiF}_6 + 2\text{H}_2\text{O}.$
Травление окислов при плазмостимулированном осаждении или формировании контактных площадок	Фторид аммония, уксусная и плавиковая кислоты.

1	2
Алюминий (Al)	1. Фосфорная (65%), азотная (1,5%), уксусная (5%) и соляная кислоты (28,5%); (азотная и соляная кислоты – окислители; фосфорная кислота – для растворения Al ₂ O ₃ ; уксусная кислота для смачивания и буферизации) 2. Гидроксид натрия или калия.
$\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{H}_3\text{PO}_4 = 2\text{AlPO}_4 + 3\text{H}_2\text{O};$ $2\text{Al} + 6\text{HCl} = 2\text{AlCl}_3 + 3\text{H}_2; \quad \text{Al} + 6\text{HNO}_3(\text{конц.}) = \text{Al}(\text{NO}_3)_3 + 3\text{NO}_2 + 3\text{H}_2\text{O};$ $2\text{Al} + 2\text{NaOH} + 6\text{H}_2\text{O} = 2\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + 3\text{H}_2.$	
Медь (Cu)	1. Хлорное железо (III), не более 70°C. 2. Соляная кислота, перекись водорода, не более 40°C.
$\text{FeCl}_3 + \text{Cu} = \text{FeCl}_2 + \text{CuCl}_2;$ $\text{Cu} + 2\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2 = \text{CuCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O};$ $\text{CuCl}_2 + 2\text{HCl} = \text{H}_2[\text{CuCl}_4];$ $\text{CuCl}_2 + 2\text{HCl} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_2\text{Cl}_4].$	
Золото (Au)	1. Соляная и азотная кислота (царская водка). 2. Цианистый калий (KCN) или натрий NaCN и перекись водорода. 3. Хлорное железо (FeCl ₃) и соляная кислота.
$\text{Au} + 4\text{HCl} + \text{HNO}_3 = \text{H}[\text{AuCl}_4] + \text{NO} + 2\text{H}_2\text{O};$ $4\text{Au} + 8\text{KCN} + 2\text{H}_2\text{O}_2 = 4\text{K}[\text{Au}(\text{CN})_2] + 4\text{KOH};$ $2\text{FeCl}_3 + 2\text{Au} + 2\text{HCl} = 2\text{Fe}[\text{AuCl}_4] + \text{H}_2.$	
Серебро (Ag)	1. Хлорное железо (FeCl ₃) или нитрат железа Fe(NO ₃) ₃ и этиленгликоль. 2. Азотная кислота.
$\text{Ag} + \text{FeCl}_3 = \text{AgCl} + \text{FeCl}_2;$ $\text{Ag} + \text{Fe}(\text{NO}_3)_3 = \text{AgNO}_3 + \text{Fe}(\text{NO}_3)_2;$ $\text{Ag} + 2\text{HNO}_3 = \text{AgNO}_3 + \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}.$	
Хром (Cr) Никель (Ni)	1. Соляная кислота. 2. Концентрированные азотная и серная кислоты пассивируют эти металлы.
$4\text{Cr} + 12\text{HCl} + 3\text{O}_2 = 4\text{CrCl}_3 + 6\text{H}_2\text{O};$ $\text{Ni} + 2\text{HCl} = \text{NiCl}_2 + \text{H}_2.$	

Как следует из вышесказанного, очистка в активных средах по отношению к полупроводниковым материалам, металлам, диэлектрическим слоям сводится к процессам их мягкого травления с целью удаления с их поверхности загрязнений вместе с частью очищаемого материала.

На производстве многие отмывочные (травящие) составы получили свое специфическое название вместе с процессом, в котором они участвуют.

В табл. 6 приведены некоторые названия таких рецептов с их основным составом и назначением.

Таблица 6

Рецептуры технологических сред, используемых на предприятиях микроэлектронного профиля

Номер п/п	Название	Основной состав	Назначение
1	Буферный раствор (BOE)	40%-й NH_4F и $\text{HF}_{\text{конц.}}$ (7:1)	Контролируемое травление SiO_2 при температуре не выше 40°C .
2	RCA-1 (перикисно-аммиачный раствор) (ПАР)	$\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (1:1:6)	При 80°C удаляют механические частицы и органические загрязнения.
3	RCA-2	$\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (1:1:6)	При 80°C удаляют металлические загрязнения.
4	SPM	$\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ (7:3)	При 120°C удаляют органические загрязнения, ионы металлов.
5	Освежающий раствор	$\text{H}_2\text{O}/\text{HF}$ (100:0,5)	Удаление естественного окисла SiO_2 .
6	В-отмывка (многостадийная)	SPM + HF + RCA-1 + RCA-2	Подготовка поверхности к проведению диффузии, ионной имплантации и эпитаксиального наращивания
7	Отмывка с использованием озона	Деионизованная вода + O_3	Удаление органических загрязнений, включая остатки резиста.

Европейская фирма IMEC, например, разработала концепцию жидкостной очистки на основе оптимизации соотношения компонентов в растворах RCA, предложив следующий подход:

1. Обработка в $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (0,05:1:5) при $85-90^\circ\text{C}$ или (0,25:1:5) при $70-75^\circ\text{C}$, что приводит к образованию на поверхности кремния слоя SiO_2 .
2. Травление образовавшегося SiO_2 в водном растворе HF.

Такой подход позволил уменьшить шероховатость поверхности пластин, снизить количество поверхностных дефектов, уменьшить количество используемых химикатов и затрат. Кроме того, добавляя O_3 , O_2 или H_2 в эти

рецептуры технологи добивались высокой эффективности очистки поверхности кремния от органических и металлических загрязнений.

1.3. Сухая очистка

К методам сухой обработки поверхности пластин относятся: отжиг (термообработка), ионное, газовое и плазмохимическое травление.

1.3.1. Термообработка

В процессе термообработки происходит удаление при высоких температурах адсорбированных поверхностью пластин загрязнений в результате их разложения и испарения. Отжиг проводят в термических установках в среде инертного газа или в вакууме непосредственно перед операциями формирования полупроводниковых или пленочных структур. Термоотжиг также эффективно используется для целей устранения последствий ионной имплантации, однако следует помнить, что это высокотемпературный процесс, который в принципе может повлиять на качество сформированных полупроводниковых структур в кристалле, особенно при переходе на субмикронные размеры формируемых элементов микросхем.

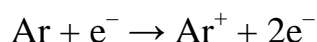
1.3.2. Ионное травление

В процессе ионного травления происходит удаление поверхностных слоев материала вместе с загрязнениями посредством бомбардировки его поверхности потоком ионов инертных газов высокой энергии (в основном аргона). Так, при очистке кремния энергия ионов достигает 1-10 кэВ. При бомбардировке поверхности пластин ионы передают поверхностным атомам обрабатываемого материала дополнительную энергию. Если передаваемая атомам энергия превышает энергию их химических связей, а сообщаемые импульсы направлены наружу от поверхности, происходит смещение атомов, их отрыв от поверхности и распыление. Процесс протекает в условиях высокого вакуума.

Эффективность удаления материала ионной бомбардировкой характеризуется **коэффициентом распыления S** , который определяется количеством распыляемых поверхностных атомов n_a , приходящихся на один бомбардирующий ион n_u , т.е. $S = n_a/n_u$. Этот параметр является одним из основных для определения скорости травления, которая, в свою очередь, зависит от массы обрабатываемого материала, состояния его поверхности, энергии и угла падения ионов, а также давления рабочего газа в камере.

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

При *ионно-плазменном травлении* держатель с пластинами, находящийся под отрицательным потенциалом, располагается в плазме газового разряда, или пластины располагают непосредственно на катоде разрядной системы. Обычно в качестве рабочего газа используют аргон, он же является плазмообразующим газом и источником ионов. Ионизация аргона происходит под действием электронного удара:



Положительно заряженные ионы аргона из зоны плазмы устремляются к отрицательно заряженному держателю пластин, ускоряются электрическим полем и бомбардируют поверхность, распыляя и, соответственно, очищая ее. При одинаковых напряжениях на электродах, плотности ионного тока, давлении инертного газа и продолжительности процесса скорости травления кремния, диэлектриков и металлов соответственно приблизительно равны 0,2; 0,1 и 0,3 мкм/мин. Процесс распыления материалов безынерционен.

При *ионно-лучевом травлении* пластины помещают на специальные мишени, которые расположены вне зоны плазмы (это позволяет управлять независимо друг от друга такими параметрами процесса, как энергия ионного пучка, угол падения ионов) и бомбардируют их ионами, создаваемыми автономным газоразрядным источником (источником ионов). Поток ионов фокусируется и управляется электрическим и магнитным полями. Положительные заряды, накапливаемые на обрабатываемой поверхности, компенсируются инъекцией электронов.

К достоинствам ионного травления можно отнести безынерционность процесса, возможность очищать поверхность подложек из любых материалов (полупроводниковых, диэлектрических и др.) от различных типов загрязнений, а также высокую эффективность при прецизионной локальной обработке. Попутно отметим, что при масочном ионном травлении удается получать наиболее вертикальные профили канавок в структуре подложки.

К недостаткам ионного травления следует отнести невысокие скорости травления и возможность образования радиационных дефектов.

1.3.3. Газовое травление

В процессе газового травления происходит химическое взаимодействие материала пластин с газообразными веществами, и образующиеся при этом соединения легко удаляются с поверхности подложки. В этом случае важно, чтобы на поверхности обрабатываемого материала не образовывались труднолетучие соединения. С целью более эффективного удаления продуктов реакции с поверхности обрабатываемых материалов процесс проводят при

больших потоках травителей и предусматривают подогрев подложек. Иногда процесс обработки проводят при пониженном давлении, правда при этом несколько уменьшается эффективность процесса травления. В качестве травителей используют смеси водорода и любого доступного инертного газа (He, Ar) с галогенами (Cl₂, Br₂), галогеноводородами HBr, HCl HF и SF₆, H₂S. Соотношение этих веществ в водороде или гелии составляет от десятых долей до десятков процентов. Температура процесса составляет 800-1300°С. Газовое травление позволяет окончательно удалить нарушенный слой и обеспечивает получение более чистой поверхности, чем при жидкостной обработке. Однако необходимость использования особо чистых газов и высокие температуры процесса ограничивают его применение.

1.3.4. Плазмохимическое травление

В процессе плазмохимического травления молекулы плазмообразующего газа распадаются в разряде на реакционно-способные частицы (ионы, свободные радикалы) и химически взаимодействуют с поверхностью подложек (физическое распыление практически отсутствует вследствие невысокой энергии ионов, порядка 100 эВ). Скорость травления зависит в основном от температуры и газового состава плазмы. Введение в плазму инертного или химически активного газа, как правило, увеличивает скорость травления. Увеличение концентрации химически активного газа влияет на суммарную скорость травления через образование химически активных радикалов. Добавки тяжелого инертного газа к плазмообразующему газу приводят к образованию в разряде тяжелых ионов и интенсифицируют химическое взаимодействие материала подложки с химически активными компонентами плазмы через очистку подложек от продуктов их взаимодействия. Такое сочетание ионного и плазмохимического травления называют ***реактивным ионно-химическим травлением***. В случае если подложки выносятся из зоны плазмы, а их травление происходит за счет ее бомбардировки осколочными ионами химически активных частиц, то такая обработка называется ***реактивным ионно-плазменным процессом***.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Тема. Очистка полупроводниковых подложек

Цель работы

1. Изучить основные виды очистки подложек, типы используемых отмывочных сред и реактивов.

2. На основе эксперимента оценить возможности, преимущества и недостатки, а также необходимость методов очистки подложек при их использовании в технологии.
3. Изучить влияние различных типов загрязнений и режимов очистки на качество получаемых изделий микроэлектроники.

Применяемые материалы

1. Перекись водорода.
2. Кислота плавиковая.
3. Гидроксид аммония.
4. Вода дистиллированная (бидистиллят).
5. Тoluол.
6. Ацетон.
7. Бумага фильтровальная.
8. Вата медицинская гигроскопическая.
9. Пластины кремниевые *n*- или *p*-типа.

Оборудование, инструменты, приспособления и контрольно-измерительная аппаратура

1. Чашка керамическая.
2. Чашка стеклянная.
3. Палочка стеклянная
4. Пинцет пластиковый.
5. Аналитические весы.
6. Секундомер.
7. Электроплитка с водяной баней.
8. Оптический микроскоп.
9. Сушильный шкаф.

Задание и ход выполнения работы

Домашняя работа:

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить необходимые экземпляры таблиц для занесения результатов лабораторных испытаний.

Результаты лабораторных измерений

Номер п/п	Время τ , с	Текущая масса образца m_i , г	Убыль массы образца Δm_i , г	
			$\Delta m_{(обр)}$, г	(Сумма по Δm_i)
1	0		–	
2	30			
3	60			
4	–	–		

3. Изучить теоретические сведения.
4. Подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

Работа в лаборатории

Очистка полупроводниковых подложек осуществляется посредством химической обработки с целью удаления загрязнений с поверхности. Широко востребованным процессом очистки кремниевых пластин является многократный процесс очистки RCA. На поверхности кремниевых подложек происходит полное удаление органических, механических загрязнений и нарушенного слоя. Последовательность операций в ходе выполнения лабораторной работы приведена ниже.

Последовательность работы в лаборатории

1. Окисление поверхности кремниевой пластины.
2. Исследование поверхности образца после обработки в ПАР.
3. Определение глубины нарушенного слоя полупроводниковой пластины (стравливание оксидной пленки вместе с загрязнениями и механическими нарушениями).

Порядок выполнения работы**1. Окисление поверхности кремниевой пластины**

Смесь RCA-1 представляет собой раствор, состоящий из 25% H_2O_2 , 25% NH_4OH и H_2O в соотношении 1:1:6. Обработка подложки проходит по следующей схеме:

- 1.1. Очистить поверхность образца последовательно в жирном растворителе (бензол, толуол, орто-ксилол и т.п.), а затем в ацетоне, используя при этом протирочную ветошь (вату) и пинцет, не допуская касаний поверхности пластины руками. Чистые образцы переносить на фильтровальной бумаге.

- 1.2. Высушить образец на воздухе или в сушильном шкафу до полного его высыхания. Поверхность чистой сухой пластины должна быть без разводов и следов от остатков растворителей (в дальнейшем травящих растворов).
- 1.3. Обработать образец в смеси RCA-1 при температуре 80°C в течение 20 минут, при этом необходимо через каждые 2 минуты добавлять по 2-3 капли H_2O_2 и NH_4OH . При обработке смесью RCA-1 на поверхности кремния нарастает окисел толщиной примерно 10-15 ангстрем. При необходимости повторить процесс.

2. Исследование поверхности образца после обработки в ПАР

После обработки следует изучить поверхность образца с помощью микроскопа.

3. Определение глубины нарушенного слоя полупроводниковой пластины

Толщину нарушенного слоя монокристалла можно оценить по изменению скорости травления при поэтапном растворении поверхностного слоя материала. Как было сказано ранее, дефектные кристаллы травятся быстрее, чем совершенный монокристалл, поэтому, определяя скорость травления при послойном удалении материала подложки, можно зафиксировать момент, когда она станет постоянной величиной. Этот факт будет указывать на полное снятие нарушенного слоя. Скорость травления проще всего определять по уменьшению массы образца, поэтому следует выполнять по следующей схеме:

- 3.1. Взвесить образец на аналитических весах. Результат замера занести в табл. 7.
- 3.2. Не касаясь образца руками, перенести образец полупроводниковой пластины в травитель (по заданию преподавателя) и обрабатывать в течение 30 секунд.
- 3.3. По истечении указанного времени промыть образец в дистиллированной воде и высушить в сушильном шкафу при температуре 80-90°C.
- 3.4. Повторять пункты 3.1-3.3 до тех пор, пока убыль массы образца не станет постоянной. В зависимости от типа выбранного травителя,

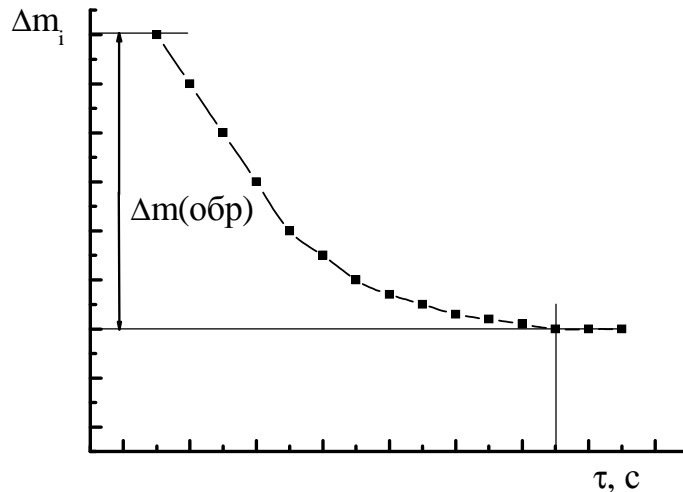


Рис. 3. Кинетическая кривая травления

предыстории обработки образца и температуры травителя – временной интервал обработки пластины в травителе может быть увеличен до нескольких минут (подбирается экспериментально). По результатам опыта строится график зависимости количества удаленного материала образца от времени, то есть кинетическая кривая травления образца (рис. 3).

- 3.5. По графику находится точка перехода кривой на горизонтальный участок и далее рассчитывается глубина нарушенного слоя по формуле, которая учитывает геометрическую поверхность пластины:

$$\delta = \frac{\Delta m_{(обр)}}{S\rho} \cdot 10^4 (\text{мкм}),$$

где $\Delta m_{(обр)}$ – общее количество удаленного материала до точки перегиба, г;

S – геометрическая поверхность образца, см^2 ;

ρ – плотность материала образца: Si – 2,33; Ge – 5,33, г/см^3 .

Контрольные вопросы к разделу "Очистка полупроводниковых подложек"

1. Какие типы загрязнений вы знаете, и что является их источником в технологии микроэлектроники?
2. Что такое технологически чистая поверхность?
3. Приведите общую классификацию методов очистки подложек с их преимуществами и недостатками, охарактеризуйте наиболее вероятные

- их области применения.
4. Охарактеризуйте метод очистки – обезжиривание в органических растворителях: область его применения, используемые реактивы, назначение, преимущества и недостатки.
 5. Охарактеризуйте метод очистки – обработка в активных средах: область его применения, используемые реактивы, назначение, преимущества и недостатки.
 6. Охарактеризуйте метод очистки – химическое травление: область его применения, используемые реактивы, назначение, преимущества и недостатки.
 7. Какие теории растворения полупроводников вы знаете?
 8. Охарактеризуйте типы травителей, применяемых в технологии микроэлектроники для целей жидкостной обработки.
 9. Охарактеризуйте методы жидкостного травления германия в технологии микроэлектроники: схемы химических реакций, условие их проведения.
 10. Охарактеризуйте методы жидкостного травления кремния в технологии микроэлектроники: схемы химических реакций, условие их проведения.
 11. Типы используемых травителей в технологии микроэлектроники для жидкостной обработки полупроводниковых материалов: примерный состав, назначение компонентов.
 12. Охарактеризуйте метод очистки подложек – термоотжиг: область его применения, назначение, преимущества и недостатки.
 13. Охарактеризуйте метод обработки подложек – ионное травление: область его применения, назначение, преимущества и недостатки.
 14. Охарактеризуйте метод обработки подложек – ионно-плазменное травление: область его применения, назначение, преимущества и недостатки.
 15. Охарактеризуйте метод обработки подложек – ионно-лучевое травление: область его применения, назначение, преимущества и недостатки.
 16. Охарактеризуйте метод обработки подложек – плазмохимическое и ионно-химическое (реактивное) травление: область его применения, назначение, преимущества и недостатки.
 17. Каким образом можно определить и как выразить скорость химического (плазмохимического) травления подложек, используемых в технологии микроэлектроники?
 18. Каким образом можно оценить качество очистки подложек, привести примеры и характеристику методов?
 19. Как влияют различные типы загрязнений на качество готовых изделий в технологии микроэлектроники?
 20. Зачем необходимо поддерживать технологическую чистоту подложек, материалов, реактивов и т.д. в технологии микро- и наноэлектроники?

2. ЭПИТАКСИЯ

Слово «эпитаксия» состоит из двух греческих слов: «эпи» – предлога «на» («над») и «таксис», означающего «упорядочивание». Другими словами, эпитаксия – это последовательное упорядоченное наращивание одного материала на поверхности другого, с получением единого монокристалла с единой кристаллической структурой. Материал подложки в процессе выращивания, таким образом, играет роль затравочного кристалла. Упорядоченность наращивания состоит в совпадении определенных плоскостей и направлений нарастающего кристалла и кристалла-подложки. Эпитаксиальный процесс отличается от выращивания монокристаллов методом Чохральского тем, что рост кристалла происходит при температуре существенно ниже температуры его плавления.

Толчком к развитию эпитаксиальных процессов послужило требование улучшения характеристик биполярных транзисторов. Ранее эти транзисторы формировали в объеме подложки, причем удельное сопротивление подложки определяло напряжение пробоя база-коллектор. Иными словами, увеличение напряжения пробоя требовало применения материала с высоким удельным сопротивлением, что при большой толщине подложки приводило к чрезмерному увеличению сопротивления коллектора, а последнее, в свою очередь, вызывало увеличение рассеиваемой мощности и уменьшение коэффициента усиления на высоких частотах. Использование высокоомных эпитаксиальных слоев на подложках с низким удельным сопротивлением позволило решить эти проблемы, то есть сильнолегированный диффузионный слой обеспечивал нужные электрические характеристики коллекторного перехода, а подложка определяла низкоомный коллекторный контакт. Кроме того, если подложка и эпитаксиальный слой имеют различный тип проводимости, то на их границе образуется *p-n* переход, который может использоваться для целей изоляции элементов на кристалле в составе микросхем (изоляция обратным смещенным *p-n* переходом). Немаловажно отметить, что эпитаксиальное наращивание сглаживало рельеф подложки, поэтому практика формирования схемотехнических элементов в объеме эпитаксиальной пленки получила название планарно-эпитаксиальной технологии. Со временем эпитаксия стала независимым технологическим процессом, с помощью которого формировали конструктивные элементы интегральных структур в составе микросхем. Так, например, скрытые высоколегированные слои, залегающие на определенной глубине от поверхности кристалла, например, в стандартной планарно-эпитаксиальной технологии (рис. 4) и технологии на основе коллекторной изолирующей диффузии – КИД (рис. 5), получают с использованием тотального (то есть по всей поверхности) процесса эпитаксиального наращивания полупроводникового материала.

В стандартной планарно-эпитаксиальной технологии за основу берут

пластину p -типа, на поверхности которой создают будущий скрытый n^+ -слой. Затем на всей поверхности пластины формируют эпитаксиальный слой n -типа (рис. 4,а) и в результате ранее сформированный n^+ -слой становится скрытым. Далее на рис. 4,б показаны сформированные изолирующие области p -типа и полученные при этом изолированные области для формирования транзисторной структуры.

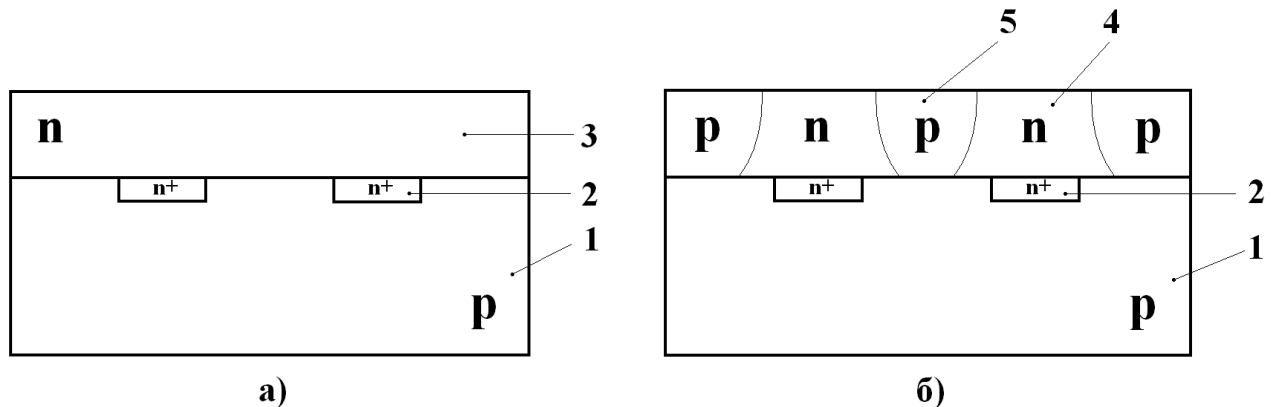


Рис. 4. Стандартная планарно-эпитаксиальная технология: а – формирование скрытого n^+ -слоя и эпитаксиального слоя n -типа; б – формирование изолирующих областей p -типа. 1 – подложка (p -типа); 2 – сильнолегированная область донорной примесью; 3 – эпитаксиальный слой n -типа; 4 – область формирования структур базы и эмиттера биполярного транзистора; 5 – изолирующая область p -типа

КИД-технология похожа на стандартную планарно-эпитаксиальную технологию, но в отличие от последней в КИД-технологии используется тонкий (не более 2 мкм) эпитаксиальный слой. На рис. 5,а показана структура кристалла после формирования скрытого n^+ -слоя и наращивания эпитаксиальной пленки p -типа. После проведения диффузии донорной примесью на всю глубину эпитаксиальной пленки получают коллекторные области и изолированные области p -типа, в которых будут формироваться эмиттерные и базовые области транзистора (рис. 5,б). Попутно отметим, что в данной технологии влияние боковой диффузии наблюдается меньше из-за более тонкого эпитаксиального слоя.

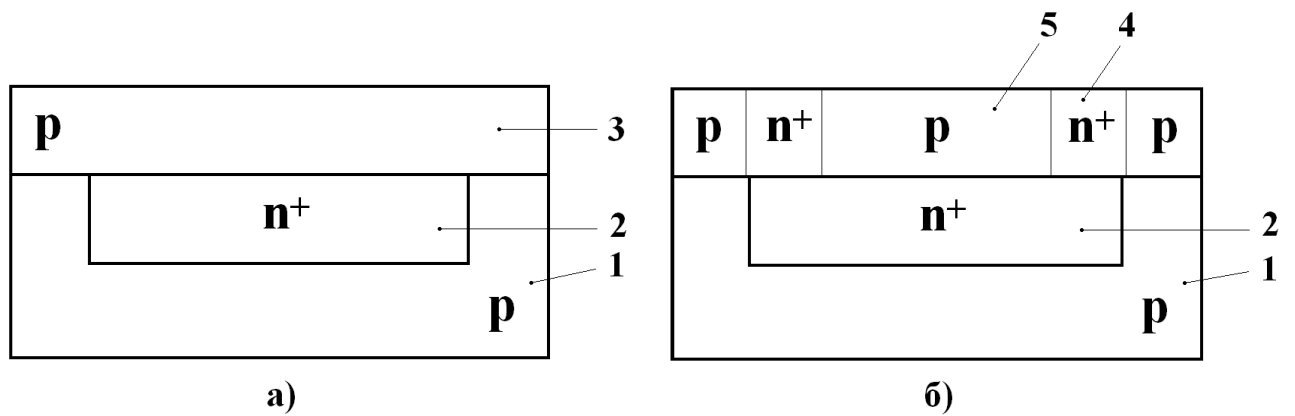


Рис. 5. КИД-технология: а – формирование скрытого n^+ -слоя и эпитаксиального слоя p -типа; б – формирование коллекторных областей биполярного транзистора. 1 – подложка (p -типа); 2 – сильнолегированная область донорной примесью; 3 – эпитаксиальный слой p -типа; 4 – коллекторные области транзистора; 5 – области формирования эмиттерных и базовых областей транзистора

Локальное эпитаксиальное наращивание реализовано, например, в эпитланарной технологии (рис. 6). Здесь за основу берут полупроводниковую пластину p -типа, последовательно формируют на ней скрытый n^+ -слой и сплошной слой SiO_2 , получаемый пиролизическим осаждением. Затем в слое диоксида кремния вскрывают окна, как показано на рис. 6,а. Далее в окна проводят локальное эпитаксиальное наращивание кремния n -типа (рис. 6,б), формируя при этом коллекторные области (n -типа проводимости) и отдельные области n -типа, в которых в дальнейшем сформируют базы и эмиттеры транзисторов ИС.

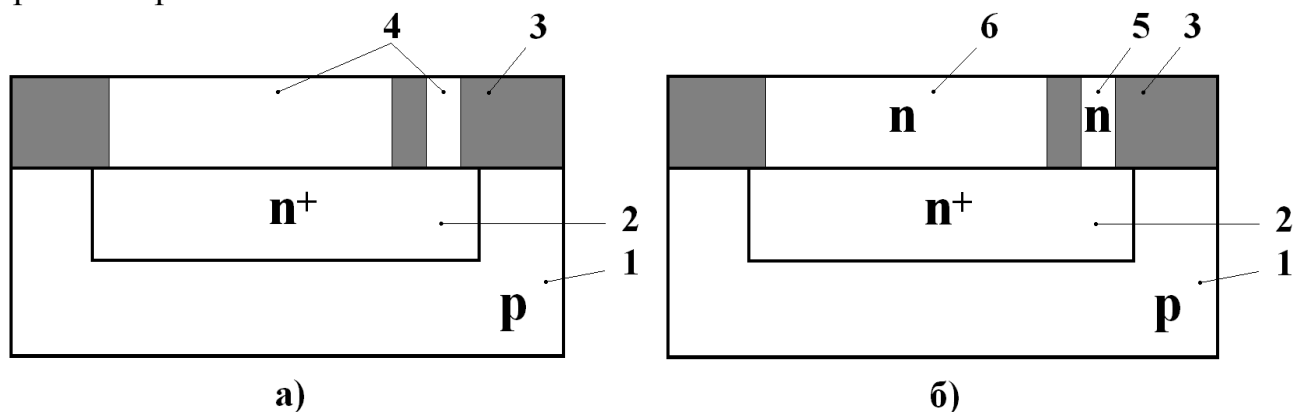


Рис. 6. Эпитланарная технология: а – формирование скрытого n^+ -слоя и вскрытие окон в сформированном слое SiO_2 ; б – локальное эпитаксиальное наращивание кремния n -типа в окнах. 1 – подложка (p -типа); 2 – сильнолегированная область донорной примесью; 3 – слой SiO_2 ; 4 – вскрытые окна в слое SiO_2 ; 5 – коллекторные области n -типа транзистора; 6 – области для формирования базы и эмиттера биполярного транзистора

Слои, полученные в результате эпитаксиальных процессов, обладают следующими особенностями:

- широкая область изменения уровня и профиля легирования;
- изменение типа проводимости выращиваемых эпитаксиальных пленок;
- физические свойства эпитаксиального слоя отличаются от свойств материала подложки в лучшую сторону, например, в них меньше концентрация кислорода и углерода, меньше число дефектов;
- процесс может происходить при меньших температурах, чем температура выращивания слитка монокристалла;
- можно наносить эпитаксиальный слой на подложку большой площади;
- эпитаксиальный слой может быть нанесен локально.

Эпитаксия позволяет получать тонкие, однородные монокристаллические слои любого типа проводимости в широком диапазоне величин удельного электрического сопротивления, которые трудно создать другими методами. Кроме того, эпитаксиальные слои в структурном отношении оказываются более совершенными, чем объемные монокристаллы. Они обладают практически идеальной однородностью распределения легирующих примесей, а содержание неконтролируемых примесей в них значительно ниже, чем в монокристаллах, полученных методом Чохральского или бестигельной зонной плавкой.

2.1. Классификация эпитаксиальных процессов

Большинство методов эпитаксии основано на технологии осаждения из парогазовой смеси. В молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) используется принципиально другой метод – конденсация молекулярных пучков в вакууме. Также известны эпитаксия из жидкой фазы (из расплава) и эпитаксия из металлоорганических соединений.

Если материал слоя и подложки идентичен, например, кремний выращивают на кремнии, процесс называют *гомоепитаксиальным*. Постоянные решеток, в данном случае и подложки и как бы отдельно стоящего гипотетического эпитаксиального слоя, полностью совпадают (рис. 7).

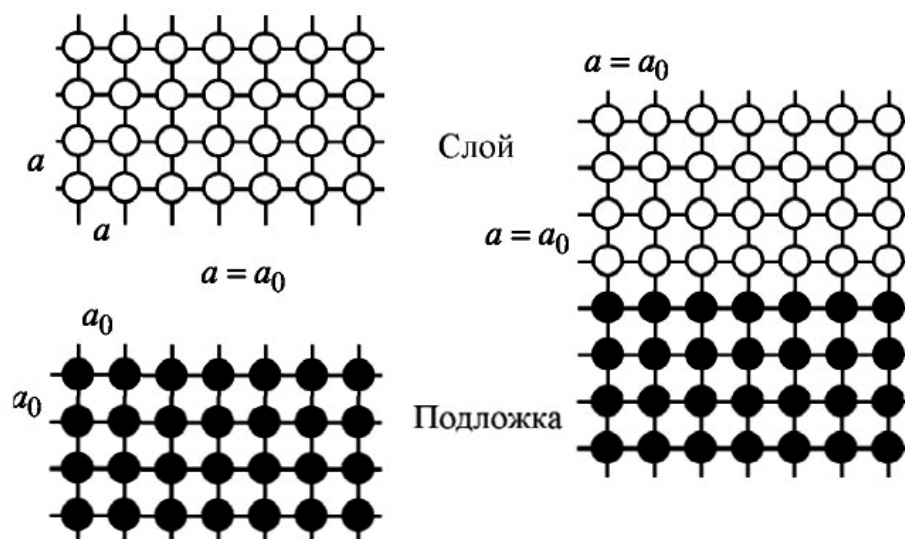


Рис. 7. Построение атомов подложки и эпитаксиального слоя при гомоэпитаксиальном росте для свободностоящих материалов (слева) и при эпитаксиальном осаждении (справа): a_0 и a – постоянные решеток подложки и свободностоящего слоя, предназначенного для эпитаксиального наращивания

В результате гомоэпитаксиального процесса мы получаем ненапряженную структуру, для которой при одинаковых уровнях легирования подложки и эпитаксиального слоя металлургическую границу различить просто невозможно. **Металлургической границей** называют условную плоскость, отделяющую подложку от эпитаксиальной пленки.

Если при реализации гомоэпитаксиального процесса происходит одновременное легирование слоя растущей пленки, то данный процесс принято называть **автоэпитаксиальным**. Классический пример автоэпитаксии реализуется в технологии двойной диффузии при производстве ИС (рис. 8). Основой данной технологии является создание изоляции транзисторов одновременной (или последовательной) диффузией атомов фосфора и мышьяка. Подложкой в данной технологии служит полупроводниковая пластина кремния p -типа, на поверхности которой формируют окна в SiO_2 для проведения диффузионного внедрения примеси (рис. 8,а). Для создания области n^+ -типа в сформированные окна внедряют одновременно фосфор и мышьяк. Заметим, что коэффициент диффузии фосфора в кремнии превышает коэффициент диффузии мышьяка, следовательно, фронт диффузионного профиля будет представлен в основном фосфором (рис. 8,б). Затем на поверхности подложек выращивают тонкий эпитаксиальный слой p -типа. В результате автолегирования в растущем эпитаксиальном слое создается область n -типа за счет атомов фосфора из n^+ -области (рис. 8,в). При этом также наблюдается дополнительная разгонка ранее внедренной n^+ -области, которая, будучи представленной теперь в основном труднодиффундируемыми атомами мышьяка, будет служить скрытым n^+ -слоем для области коллектора будущего

транзистора. В созданных карманах n -типа за счет автолегирования далее будут сформированы базы и эмиттеры транзисторов ИС.

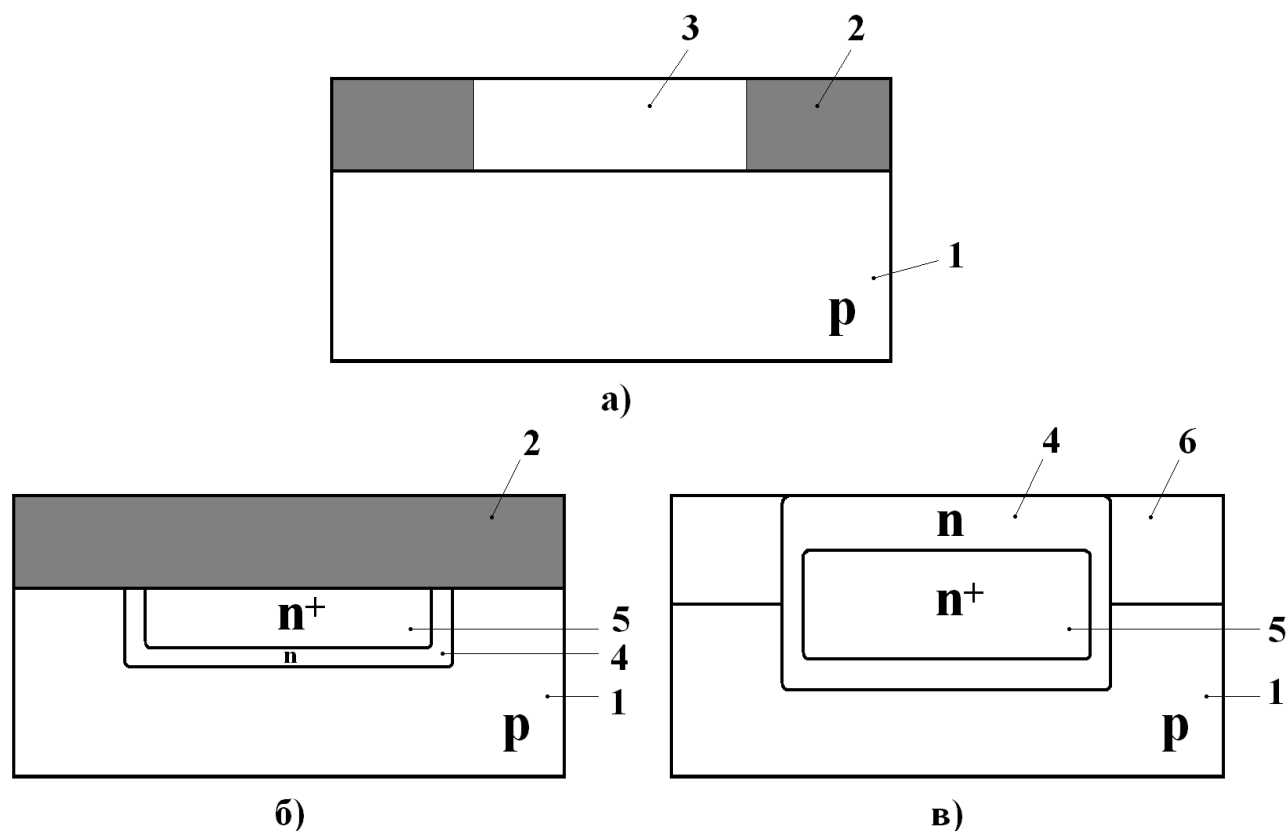


Рис. 8. Автоэпитаксия: а – формирование окон в слое SiO₂; б – диффузия одновременно фосфора и мышьяка в окна SiO₂; в – формирование эпитаксиального слоя p -типа с одновременной разгонкой примеси за счет автолегирования. 1 – подложка (p -типа); 2 – слой SiO₂; 3 – вскрытое окно в слое SiO₂; 4 – фронт диффузионного профиля (фосфора); 5 – сильнолегированная область донорными примесями (P+As); 6 – эпитаксиальный слой p -типа

Итак, совмещение процесса роста эпитаксиальной пленки и ее легирования получил название **автолегирования**. Метод технологичен, но имеет существенный недостаток, связанный, в первую очередь, с проникновением примесей в растущий эпитаксиальный слой с обратной стороны подложек или через боковые поверхности пластины. Это явление в значительной степени зависит от температуры. Для снижения общей температуры процесса эпитаксию можно проводить, восстанавливая тетрабромид кремния в водороде при 1050°C: $\text{SiBr}_4 + 2\text{H}_2 = \text{Si} + 4\text{HBr}$ или разлагая силан при 950-1050°C: $\text{SiH}_4 = \text{Si} + 2\text{H}_2$. Автолегирование с обратной стороны подложки может быть устранено маскированием ее с этой стороны слоем окисла или нитрида кремния.

Если же при ориентированном наращивании материал эпитаксиального слоя и подложки различается, то такой процесс называют **гетероэпитаксиальным**. В этом случае практически всегда постоянные

решеток подложки и отдельно стоящего эпитаксиального слоя отличаются, поэтому в зависимости от степени рассогласования их кристаллических структур различают *псевдогетероэпитаксиальный процесс*, когда постоянная решетки эпитаксиального слоя подстраивается под кристаллическую структуру подложки (рис. 9) и *метегетероэпитаксиальный процесс*, когда значительные механические напряжения на металлургической границе приводят к сдвигам или вклиниваем дополнительных атомных плоскостей (рис. 10). Исключением является гетероструктура AlGaAs, выращенная на подложке из GaAs. Постоянные решеток этих двух соединений отличаются всего на несколько десятых процента. Во всех остальных случаях мы имеем либо напряженные гетероструктуры (упруго растянутые или упруго сжатые), либо структуры с дислокациями несоответствия в области металлургической границы.

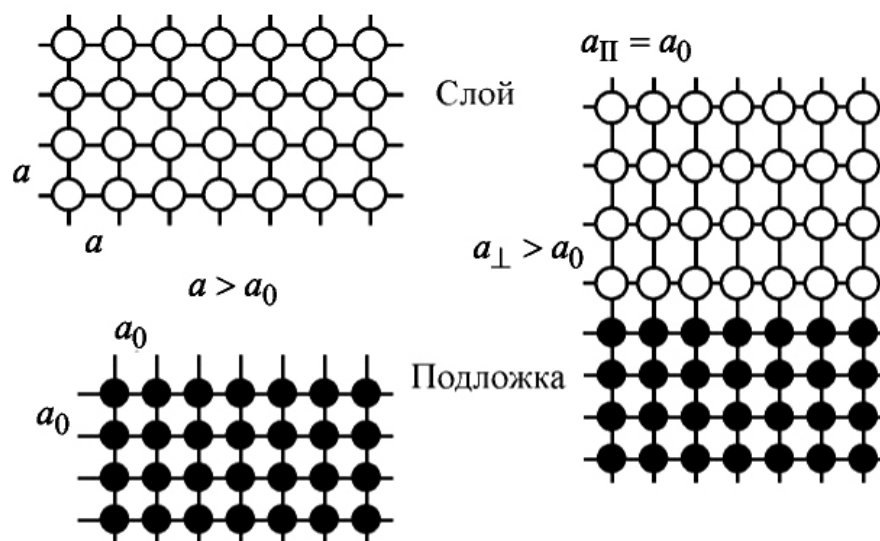


Рис. 9. Построение атомов подложки и эпитаксиального слоя при псевдоморфном росте (упругое сжатие) для свободностоящих материалов (слева) и при эпитаксиальном осаждении (справа): a_0 и a – постоянные решеток подложки и отдельно стоящего слоя; a_{\parallel} и a_{\perp} – трансформированные постоянные решеток эпитаксиального слоя в направлении металлургической границы и перпендикулярно ей, то есть в направлении роста пленки

В случае псевдоморфного роста решетка эпитаксиального слоя подстраивается под решетку подложки, претерпевая упругое растяжение и (или) сжатие, так, что $a_{\perp} > a_0$, а $a_{\parallel} = a_0$.

Интерес к подобному механизму роста кристалла вызван тем, что искажение кристаллической решетки слоя по отношению к случаю свободностоящего (ненапряженного) материала и возникающее упругое напряжение приводят к изменениям в электронной (зонной) структуре.



Рис. 10. Построение атомов подложки и эпитаксиального слоя при метаморфном росте кристалла: a_0 и a – постоянные решеток подложки и эпитаксиального слоя

Процесс гетероэпитаксии всегда начинается по псевдоморфному механизму. Однако при увеличении толщины слоя выше некоторого критического значения происходит резкая перестройка кристаллической структуры, результатом которой является уменьшение механического напряжения в эпитаксиальном слое и возникновение дислокации.

Толщина слоя, вплоть до которой поддерживается псевдоморфный рост, называется **критической толщиной**. Для количественного описания механизма псевдоморфного роста вводится понятие степени рассогласования материалов. Степень рассогласования эпитаксиального слоя по отношению к подложке « δ » определяется следующим образом: $\delta = (a - a_0) / a_0$, где a и a_0 – постоянные решетки слоя и подложки соответственно. Степени рассогласования некоторых полупроводниковых пар приведены в табл. 8.

Таблица 8

Степени рассогласования некоторых полупроводниковых пар

Подложка	Эпитаксиальный слой	Рассогласование, %
GaAs	AlAs	0,13
GaAs	InAs	7,2
GaAs	GaP	-3,6
InP	InAs	3,2
InP	GaAs	-3,8

Положительное значение степени рассогласования говорит об упругосжатых слоях, а отрицательное – об упругорастянутых.

Для многих пар полупроводников величина максимального рассогласования материалов такова, что псевдоморфно могут быть осаждены лишь слои, толщина которых не превышает сотни или нескольких сотен ангстрем. Таким образом, обычно можно говорить лишь об упругонапряженных квантовых ямах.

Поскольку постоянная решетки твердого раствора связана с его химическим составом законом Вегарда, можно говорить о зависимости критической толщины эпитаксиального слоя от его химического состава. Для примера на рис. 11 приведена зависимость критической толщины для слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$, осаждаемого на поверхности GaAs (100), в зависимости от состава x .

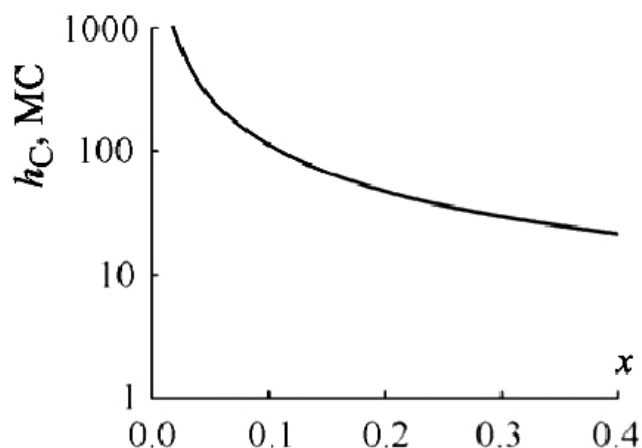


Рис. 11. Зависимость критической толщины h_c , выраженная в монослоях (МС) для слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ на подложке GaAs

Дислокации несоответствия обычно не представляют опасности для возможных приборных применений, поскольку они локализованы вблизи металлургической границы, образованной рассогласованным эпитаксиальным слоем и подложкой, и, таким образом, пространственно отделены от вышележащих слоев.

Кроме того, носители заряда в активной области прибора могут быть отделены от дислокаций несоответствия с помощью дополнительных барьерных слоев. Однако эксперименты по выращиванию полупроводниковых материалов с отличающимися постоянными решетки показывают, что помимо дислокаций в области металлургической границы происходит формирование прорастающих дислокаций, линии которых могут проникать в вышележащие эпитаксиальные слои и влиять на характеристики ИС.

Говоря об эпитаксиальных процессах, часто выделяют *хемозпитаксию*, как процесс выращивания монокристаллического слоя вещества, в результате которого образование новой фазы происходит при химическом взаимодействии вещества подложки с веществом, поступающим из внешней среды. Полученный хемозпитаксиальный слой в области металлургической границы

отличается по составу как от вещества подложки, так и от вещества, поступающего на ее поверхность извне.

2.2. Методы проведения эпитаксии

Как уже говорилось ранее, эпитаксия возможна из любой фазы: газовой (газофазная эпитаксия), жидкой (жидкостная или жидкофазная эпитаксия) и твердой (твердофазная эпитаксия). Преимущественное развитие получил первый вид эпитаксиальных процессов.

2.2.1. Газофазная эпитаксия

Методы газофазной эпитаксии основаны на осаждении из газовой фазы вещества, полученного в результате следующих химических реакций:

- восстановления хлоридов Si или Ge водородом (например, $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{Si} + 4\text{HCl}$ – т.н. хлоридный процесс);
- пиролитического разложения силана ($\text{SiH}_4 = \text{Si} + 2\text{H}_2$);
- диспропорционирования дихлоридов Si и Ge (например, $2\text{SiCl}_2 \rightleftharpoons \text{Si} + \text{SiCl}_4$) и др.

Процессы осуществляются в установках «Эпиквар». Газовая система обеспечивает подачу в реакторную ростовую камеру газовой смеси требуемого состава. Добавляя к газовой смеси соединения легирующих элементов, выращивают эпитаксиальные слои *n*- или *p*-типа соответственно. Температура процесса определяется кинетикой химических реакций и обычно находится в пределах 800-1250°C. На рис. 12 показана обобщенная схема установки газофазной эпитаксии.

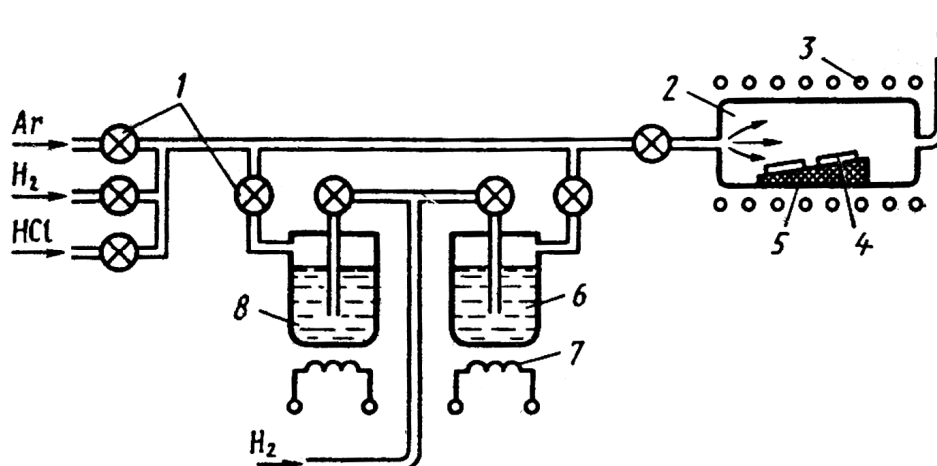


Рис. 12. Схема установки газофазной эпитаксии: 1 – вентили; 2 – реактор; 3 – ВЧ-индуктор для нагрева; 4 – подложки; 5 – держатели подложек; 6 – источник легирующей примеси (питатель); 7 – нагреватель резистивного типа; 8 – источник SiCl_4 (его также принято называть питателем)

Процесс эпитаксиального роста следует рассматривать как последовательность гетерогенных стадий:

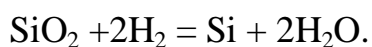
1. Переноса реагирующих веществ через газовую фазу к поверхности подложки и их адсорбции.
2. Реакции или серии реакций на поверхности с выделением атомов кремния и легирующей примеси.
3. Миграции атомов кремния по поверхности подложки и их присоединения к ступенькам роста.
4. Десорбции и переноса газообразных продуктов реакции к основному потоку газа и их удаление.

Любая установка эпитаксиального наращивания, независимо от ее модификации, имеет системы подачи; очистки; осушения газов или легколетучих соединений (присутствие посторонних примесей и особенно влаги и кислорода недопустимо); кварцевый реактор вертикального или горизонтального видов; системы нагрева подложек посредством либо ВЧ-индуктора, либо ИК-нагрева (инфракрасный нагрев); часто в состав установки входят системы перемещения подложек на держателях для более равномерного выращивания эпитаксиальных пленок.

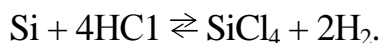
Процесс осаждения эпитаксиальных пленок должен строго соответствовать технологическому регламенту.

После загрузки пластин камеру продувают аргоном или очищенным азотом, который вытесняет из системы воздух, так как воздух с водородом при нагревании может образовать взрывоопасную смесь.

После продувки системы инертным газом подложки обрабатывают 5-20 мин при температуре 1200-1250°C в потоке водорода. При этом всегда имеющийся на их поверхности диоксид кремния восстанавливается до аморфного кремния по реакции:



Получающийся при этом кремний эпитаксиально никак не связан с подложкой, является достаточно рыхлым и его необходимо удалить. Для этого используют HCl, создавая его избыток в реакторе, уменьшая подачу водорода и обеспечивая в потоке газа через реактор избыточную концентрацию сухого хлористого водорода на уровне примерно 5% при той же температуре. При этом за 5-10 мин аморфный кремний и нарушенный слой полностью стравливаются с поверхности подложек в соответствии с реакцией:



Заметим, что основная реакция образования кремния в хлоридном процессе обратима и реакция травления кремния хлористым водородом, по

сути, это тот же самый процесс, но протекающий в обратном направлении из-за избытка HCl в реакторе.

Закончив травление в хлористом водороде, прекращают его подачу, продувают систему водородом и начинают пропускать водород через питатели SiCl₄ и источник легирующей примеси (8 и 6 на рис. 12).

Если необходимо получить эпитаксиальный слой *n*-типа, то для легирования используют жидкие PCl₃, PBr₃ или газообразный PH₃, содержащие фосфор. Слой *p*-типа получают легированием кремния бором из его соединений, находящихся в жидком (BBr₃) или газообразном (B₂H₆) состояниях.

В результате реакции восстановления тетрахлорида кремния водородом выделяется кремний, который идет на рост эпитаксиальной пленки. Легирование этой пленки происходит в результате одной из следующих реакций:



Максимальную скорость наращивания кремния при температуре 1170°C получают, когда молярная концентрация SiCl₄ равна 0,1 г/л. Обычно концентрацию SiCl₄ делают еще меньше (на уровне 0,02 г/л), что позволяет создать условия формирования слоя, близкие к равновесным, и получить практически бездефектную эпитаксиальную пленку. Равновесными называют условия, когда скорость выделения кремния на поверхности подложки равна скорости его встраивания в кристаллическую решетку.

Скорость роста эпитаксиального слоя зависит:

1. От температуры и при 1100, 1200 и 1270°C ее оптимальные значения соответственно составляют 0,1; 1,0 и 5,0 мкм/час.
2. От типа соединения, являющегося источником кремния. В табл. 9 приведены технологические параметры процесса эпитаксиального наращивания кремния из различных соединений.

Таблица 9

Параметры эпитаксиального роста кремния в атмосфере водорода

Исходное соединение	Скорость роста, мкм/мин	Температура, °C	Требуемая концентрация окислителя, 10 ⁻⁶ %
SiCl ₄	1,5	1250	5-10
SiHCl ₃	2,0	1200	5-10
SiH ₂ Cl ₂	3,0	1150	<5
SiH ₄	0,3	1050	<2

3. От кристаллографической ориентации пластины. Так, например, в направлении [100] слои растут медленнее, чем в направлении [110].

Критерии выбора источника кремния в хлоридном процессе его эпитаксиального наращивания

1. Силан обычно выбирают, когда необходимо уменьшить температуру процесса. Однако при высоких температурах он склонен к газофазному разложению (формированию кремниевых частиц в газовом объеме около подложки, а не на ее поверхности), что ведет к ухудшению качества эпитаксиальных слоев. Другой недостаток силана – быстрое загрязнение стенок реакционной камеры, требующее частой чистки. Кроме того, силан самовоспламеняется при концентрации более 2%.
2. Дихлорсилан позволяет получать высокие скорости роста при относительно низкой температуре. При нормальных условиях – это жидкость, но характеризующаяся высоким давлением насыщенного пара и, поэтому, может подаваться в реактор прямо из баллона. Барботер в этом случае не нужен, что упрощает конструкцию технологической установки.
3. Трихлорсилан применяется для получения поликристаллического кремния. Он не дает каких-либо существенных преимуществ перед тетрахлоридом кремния и редко используется для эпитаксии из газовой фазы.
4. Тетрахлорид кремния – наименее химически активное и наиболее широко используемое соединение из всех кремнийсодержащих соединений. При комнатной температуре – это жидкость, и вследствие низкого давления паров для активизации испарения требуется применение барботера. Высокая температура роста, необходимая для получения кремния, уменьшает количество дефектов.

Ограничения газофазной эпитаксии

Эпитаксиальные слои с помощью газофазной эпитаксии редко получают с концентрацией примеси выше 10^{17} см^{-3} . Слои с такой концентрацией используются, например, в биполярной технологии при изготовлении транзисторов с эпитаксиальной базой. Наиболее широкое применение находят слои с концентрацией примеси от 10^{14} до 10^{17} см^{-3} . Высокоомные слои с концентрацией примеси 10^{12} см^{-3} используются для специальных видов высоковольтных и выпрямительных приборов. Для получения высокоомных слоев необходимы очень чистый реактор и кремнийсодержащее соединение с малым содержанием примеси. Нижний теоретический предел легирования кремния составляет $1,45 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, что соответствует собственной проводимости кремния при 23°C . Обычно получаемая однородность удельного сопротивления по диаметру пластины составляет $\pm 10\%$, а в некоторых случаях, возможно,

получить и $\pm 5\%$. Изменение этого параметра, получаемого по всем пластинам в ходе одного процесса и от процесса к процессу, составляет не более 20% и зависит от вида реактора и типа процесса.

Максимально возможная толщина эпитаксиального слоя определяется прирастанием боковых поверхностей подложки к подложкодержателю, что существенно затрудняет отделение подложек при их выгрузке и может приводить к их разрушению. Однако для изготовления некоторых силовых приборов изготавливаются эпитаксиальные структуры толщиной в несколько сотен микрон, что примерно соответствует предельно возможной толщине. Получение тонких слоев затрудняется автолегированием, однако в настоящее время в технологии выращивают слои толщиной 0,5 мкм. Освоено производство слоев с однородностью $\pm 5\%$ и воспроизводимостью от процесса к процессу $\pm 5\%$ и лучше. Основным дефектом при получении эпитаксиальных структур являются фигуры скольжения на поверхности полупроводника. Они представляют собой выход дислокаций на поверхность полупроводниковой пластины и появляются вследствие несоблюдения температурных режимов и неравномерного прогрева пластин.

2.2.2. Эпитаксия из металлоорганических соединений

Данный процесс можно рассматривать как разновидность эпитаксии из газовой фазы, часто его также называют *металлоорганическая газофазная эпитаксия* (МОГФЭ) (MOCVD – Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOVPE – Metal Organic Vapor Phase Epitaxy). Этот процесс используется для роста кристаллов с 60-х годов прошлого столетия.

В МОГФЭ для подвода вещества (прекурсора) к растущему слою используются летучие металлоорганические соединения. Примерами таких соединений, используемых для эпитаксии полупроводников A^3B^5 , являются триметилгаллий $(CH_3)_3Ga$ (TMGa), триметилалюминий $(CH_3)_3Al$ (TMAI) и триметилиндий $(CH_3)_3In$ (TMIn). Элементы пятой группы обычно подаются в виде гидридов, таких как арсин (AsH_3) или фосфин (PH_3) , стибин (SbH_3) . Основными легирующими примесями при получении монокристаллов *n*-типа являются S, Se, Te, Si, Sn, а при получении монокристаллов *p*-типа – Zn.

Упрощенная блок-схема, иллюстрирующая основные компоненты МОГФЭ-установки, приведена на рис. 13, а на рис. 14 показана развернутая схема этой установки.

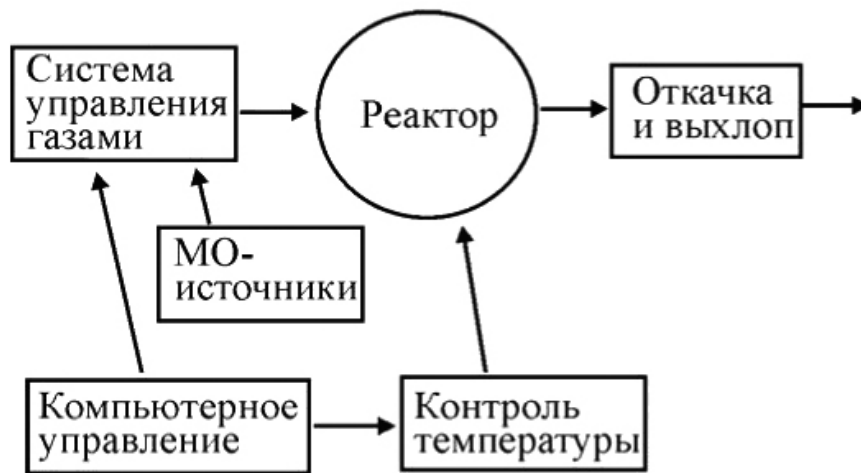


Рис. 13. Структурная схема установки металлоорганической газофазной эпитаксии

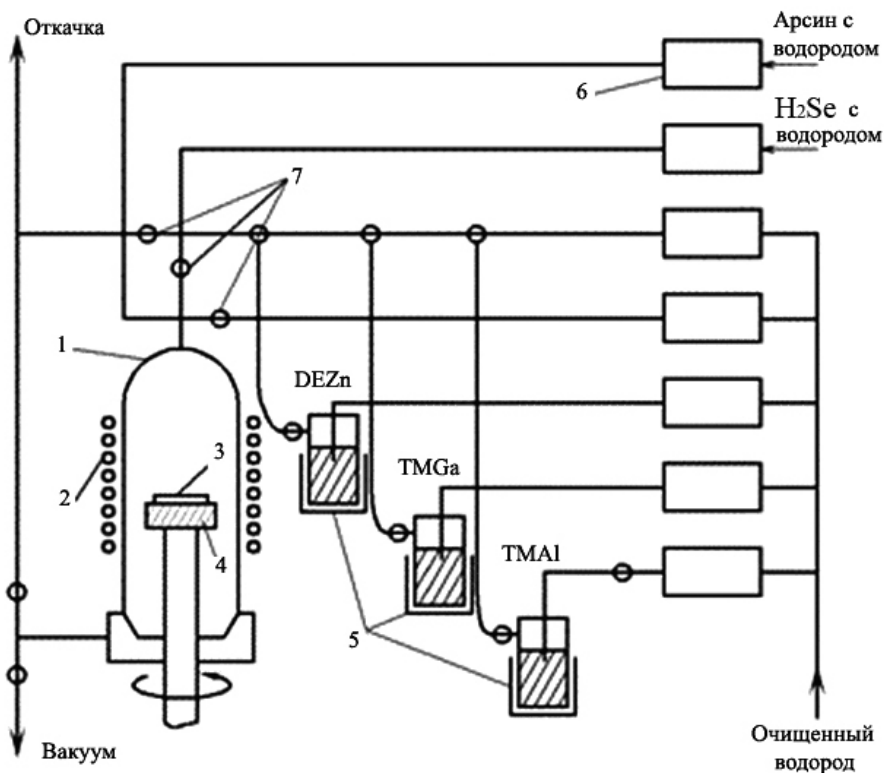


Рис. 14. Схема установки для MOCVD с вертикальным реактором для атмосферного давления: 1 – кварцевый реактор; 2 – индуктор для нагрева; 3 – подложка; 4 – термостабилизированный подложкодержатель; 5 – термостабилизированные источники металлоорганических соединений; 6 – датчики потока; 7 – пневматические клапаны. (Примечание: DEZn – диэтил цинка)

В системе контроля газов, управляемой от компьютера, подаваемые вещества контролируются на чистоту и смешиваются, после чего подаются в реактор. Реактор может быть вертикального либо горизонтального типа. Система откачки и выхлопа включает различные насосы, а также устройство обработки (дожита) выхлопа, так называемый скруббер, назначение которого дожечь отходящую органику до CO_2 и H_2O .

В методе MOCVD рост слоя осуществляется при термическом разложении (пиролизе) газов, поступающих в реактор, и последующей химической реакции между возникающими компонентами на нагретой пластине-подложке. В настоящее время посредством этого метода можно выращивать большинство полупроводниковых соединений A^3B^5 , A^2B^6 , A^4B^4 .

Эпитаксия в процессе MOCVD осуществляется при пропускании однородной газовой смеси реагентов с газом-носителем над нагретой подложкой в реакторе с холодными стенками. Энергия для нагревания газовой смеси обычно создается мощным радиочастотным генератором с частотой порядка 450 кГц. Этот же генератор нагревает и графитовый держатель, на котором размещена монокристаллическая подложка. При этом газовая смесь вблизи поверхности подложки нагревается до высоких температур, а стенки реакционной камеры остаются относительно холодными, что приводит к осаждению полупроводниковой пленки только на поверхности подложки (реакция идет при повышенных температурах) при малых потерях реагирующих веществ на поверхности реактора. Тщательно контролировать необходимо только температуру подложки, причем небольшие ее изменения не играют роли, поскольку большинство свойств пленок, полученных MOCVD, малочувствительны к таким изменениям температуры.

Парциальными давлениями различных газовых компонентов можно управлять с помощью электроники, контролирующей скорость потока от каждого из источников. Это позволяет с высокой точностью управлять всеми параметрами роста, обеспечивая надежную воспроизводимость результатов.

Металлоорганические соединения, используемые для получения полупроводниковых пленок при комнатной температуре, как правило, являются жидкостями, обладают высоким давлением паров и могут быть легко доставлены в зону реакции путем пропускания газа-носителя, например H_2 , через жидкости, которые играют роль источников. Кроме того, используемые для роста полупроводниковых пленок гидриды при комнатной температуре являются газами и обычно используются в качестве добавок к H_2 . Эти металлоорганические и гидридные компоненты смешиваются в газовой фазе и пиролизуются при 600-800°C в потоке водорода в открытом реакторе при атмосферном или пониженном давлении.

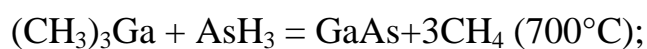
В большинстве случаев при выращивании полупроводниковых эпитаксиальных пленок используется метиловая и этиловая металлоорганика. Такие соединения легко пиролизуются в атмосфере водорода, выделяя атомы соответствующего металла, а в качестве побочных продуктов выступают

газообразные метан или этан, которые могут быть легко удалены из ростовой камеры.

Многослойные, многокомпонентные эпитаксиальные структуры могут быть последовательно получены в едином ростовом цикле.

Этим методом возможно получение резких границ между различными слоями, причем возрастает однородность слоев по толщине и составу, так как процесс роста не является результатом конкуренции между осаждением и травлением, как при гидридном процессе. Этот процесс может быть воспроизведен в большом объеме. При необходимости могут быть достигнуты высокие скорости роста, удовлетворяющие требованиям промышленности.

Основные химические реакции, например, в случае выращивания GaAs и $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ записываются следующим образом:



Легирование растущего эпитаксиального слоя при MOCVD осуществляется путем введения в газовый поток соответствующего реагента. Этот реагент будет диффундировать через пограничный слой так же, как основные реагенты. Встраивание же примесей в кристаллическую решетку может определяться либо поверхностной кинетикой, либо скоростью протекания химических реакций реагентов.

Увеличение парциального давления реагентов в газовом потоке и повышение температуры подложки увеличивает скорость роста слоя, когда она лимитируется поверхностной кинетикой. Но для экзотермических процессов, как правило, имеющих место при MOCVD, повышение температуры подложки уменьшает равновесный выход материала, то есть если скорость роста определяется термодинамикой, то увеличение температуры подложки уменьшает ее. Если процесс роста лимитируется диффузией, то температура мало влияет на скорость роста.

Влияние ориентации подложки существенно лишь в случае роста, лимитируемого поверхностными кинетическими явлениями.

2.2.3. Молекулярно-пучковая (лучевая) эпитаксия

Молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ; от англ. molecular beam epitaxy – MBE) была разработана в начале 70-х годов XX века как способ осаждения высокочистых слоев полупроводниковых соединений. МПЭ представляет собой процесс эпитаксиального роста в результате взаимодействия одного или нескольких атомарных или молекулярных пучков с нагретой подложкой в условиях сверхвысокого вакуума при давлении 10^{-6} - 10^{-8} Па.

Существует несколько разновидностей МПЭ в зависимости от того, что служит источниками вещества:

1. В наиболее широко распространенной разновидности МПЭ с твердотельными источниками молекулярные пучки образуются в результате испарения вещества, загруженного в эффузионные ячейки, изготовленные из термически стойкого материала (например, пиролитического нитрида бора). При этом поток поступающих к подложке частиц будет пропорционален давлению паров в ячейке. Плавное изменение состава, уровня легирования и скорости роста пленки производится изменением температуры ячейки, а резкая смена выращиваемого материала осуществляется закрытием заслонок соответствующих ячеек.
2. В других разновидностях метода все или некоторые вещества могут подаваться в газообразном виде. Например, если в МПЭ с твердотельными источниками поток мышьяка возникает в результате нагрева слитка металлического мышьяка, в МПЭ с газовыми источниками мышьяк может поставляться в виде арсина (AsH_3), разлагаемого (крекингуемого) при вводе в систему на мышьяк и водород.

Ростовая камера схематически представлена на рис. 15. Важное преимущество МПЭ по сравнению с другими эпитаксиальными технологиями заключается в возможности использования разнообразных методов контроля непосредственно в процессе осаждения. К таким методам относятся:

- дифракция быстрых электронов (ДБЭ) под скользящими углами, позволяющая судить о состоянии поверхности эпитаксиального слоя непосредственно во время роста;
- масс-спектрометрия остаточной атмосферы камеры;
- использование ионного датчика, устанавливаемого на пути атомарных пучков, показания которого позволяют проводить измерения потоков элементов, поступающих на подложку.

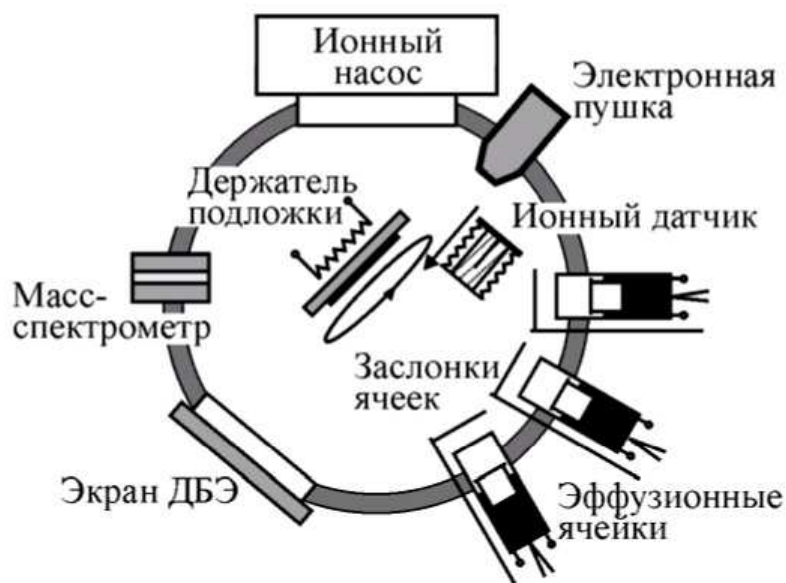


Рис. 15. Ростовая камера установки МПЭ

Образцы располагаются на специальных держателях внутри камеры. Для улучшения однородности слоев по поверхности растущей пластины держатель образцов вращается в процессе осаждения.

Наиболее распространены установки, предназначенные для осаждения материалов по типу арсенида галлия, таких как (Ga, Al, In, As). Металлы III группы (Al, Ga, In) испаряются в атомарном виде, тогда как элементы V группы типично поступают на подложку в виде тетрамеров (As_4).

В качестве примесей достаточно часто используются кремний (*n*-типа) и бериллий (*p*-типа), испаряемые из эффузионных ячеек. В качестве примеси *p*-типа также получил распространение **углерод**, позволяющий достигать больших по сравнению с **бериллием** уровней легирования. Углерод обычно поставляется в газообразном виде (CBr_4) или с помощью нагрева графитового стержня.

К преимуществам метода МПЭ относятся:

- низкая температура процесса. Снижение температуры процесса уменьшает диффузию примеси из подложки и автолегирование. Это позволяет получать качественные тонкие слои;
- высокая точность управления уровнем легирования. Легирование при использовании данного метода является безынерционным, что позволяет получать сложные профили легирования;
- контроль за ходом роста пленки, ее составом и степенью шероховатости поверхности подложки в процессе роста пленки.

Одной из отличительных особенностей МПЭ является низкая скорость роста пленки: приблизительно 1 монослой/с, что позволяет легко модулировать молекулярные пучки, попадающие на подложку, если время управления

движением заслонки менее 1 с. Процесс МПЭ используется для получения тонких (0,5...50 нм) структур с контролируемыми поперечными размерами.

2.2.4. Жидкофазная эпитаксия

Процесс жидкофазной эпитаксии (LPE; от англ, liquid phase epitaxy) заключается в выращивании монокристаллического слоя полупроводника на подложке из расплава или раствора-расплава, насыщенного полупроводниковым материалом. При этом полупроводник эпитаксиально кристаллизуется на поверхности подложки, погруженной в расплав, при его охлаждении. Процесс можно проводить при относительно невысоких температурах (400-500°C). Жидкофазная эпитаксия позволяет получить многослойные эпитаксиальные структуры и слои определенной конфигурации (например, с помощью маски из SiO₂).

Исключительно важной особенностью жидкостной эпитаксии является возможность получать качественные гетеропереходы. Процесс протекает с выделением тепла, т.е. является экзотермическим. В результате для формирования эпитаксиальной пленки необходимо снижение температуры подложки с находящимся на ней слоем расплава-раствора. Причем, для различных веществ, спад температуры должен протекать по своему определенному закону, называемому температурным профилем.

Процесс можно разделить на следующие технологические этапы:

1. Элементарное вещество, твердый бинарный или тройной раствор расплавляется в соответствующем легкоплавком, химически не активном к раствору и подложке веществе, чаще всего в металле.
2. Далее раствор-расплав термостатируется и приводится в контакт с подложкой.
3. После установления теплового равновесия между подложкой и расплавом последний охлаждается для эпитаксиального осаждения пленки на подложку. Для некоторых веществ эпитаксиальное осаждение слоев из раствора-расплава проводится при наличии градиента температуры, создаваемого вдоль подложки. Примеси для получения легированных эпитаксиальных слоев вводятся в раствор-расплав либо во время приготовления шихты до ее расплавления, либо из газовой фазы после расплавления.
4. После осаждения эпитаксиального слоя избыточный раствор-расплав механически удаляется с подложки, при этом может использоваться метод центрифугирования.
5. Затем подложка с осажденным слоем охлаждается до комнатной температуры.

Исходя из рассмотренного технологического процесса, можно

сформулировать требования к эпитаксиальному оборудованию:

1. Нагревательная печь должна быть малоинерционна и иметь температурный интервал нагрева от 300 до 1100°C, позволяющий удовлетворить требования по расплавлению шихты из различных материалов, применяемых для жидкостной эпитаксии. Точность поддержания температуры должна быть не хуже $\pm 0,75^\circ\text{C}$. Для установок с непрерывным циклом эпитаксиального осаждения необходимо иметь несколько температурных зон:
 - зону расплавления шихты и нагрева подложки;
 - зону приведения в контакт раствора-расплава с подложкой и выдержки их в течение некоторого времени;
 - зону с градиентом температуры в сторону ее понижения для обеспечения процесса эпитаксиального осаждения;
 - зону охлаждения подложек.
2. В реакционной камере должны быть предусмотрены механизм или устройство для приведения раствора-расплава в контакт с подложкой.
3. Раствор-расплав перед осаждением на подложку должен быть получен в тигле, химически не активном к нему.
4. Материал реакционной камеры должен быть также химически не взаимодействующим с подложкой и раствором-расплавом.
5. При проведении эпитаксиального наращивания в реакторе не должно быть посторонних примесей, поэтому в реакторе либо создается поток очищенного инертного газа, либо вакуумными насосами создается разрежение.

Известны установки открытого или закрытого типов. В установке открытого типа непрерывно в течение всего процесса в реактор поступает очищенный инертный газ, чаще всего в смеси с очищенным водородом, который, разрушая окисел на поверхности раствора-расплава, обеспечивает проведение восстановительной реакции. В установках закрытого типа в реакторах создается вакуум. В некоторых случаях перед контактированием раствора-расплава с подложкой в реактор закрытого типа вводят водород для разрушения образовавшегося слоя окисла на поверхности расплава, а затем снова его вакуумируют вплоть до окончательного охлаждения подложек с осажденными слоями.

Жидкофазная эпитаксия применяется главным образом в технологии микроволновых интегральных схем и при изготовлении светодиодов определенных длин волн, а также в случае необходимости получения сильнолегированных слоев и *p-n* переходов высокого качества. Стоит отметить, что жидкофазная эпитаксия не нашла широкого применения для получения эпитаксиальных слоев элементарных полупроводников (Si, Ge), так как не

нашлось такого легкоплавкого материала, который в достаточном количестве растворял бы в себе полупроводник, не загрязняя его в процессе эпитаксиального роста.

Контрольные вопросы к разделу "Эпитаксия"

1. Что такое процесс эпитаксии?
2. Что такое процесс гомоэпитаксии?
3. Что такое процесс гетероэпитаксии?
4. Что такое процесс хемоэпитаксии?
5. Для чего используются эпитаксиальные слои?
6. Назовите возможные виды дефектов при росте эпитаксиальной пленки.
7. Приведите регламент работы оборудования для газофазной эпитаксии.
8. Охарактеризуйте процесс газофазной эпитаксии.
9. При каких условиях проведения процесса осаждения пленка не будет являться эпитаксиальной?
10. Охарактеризуйте кинетику процесса газофазной эпитаксии.
11. Перечислите ограничения газофазной эпитаксии.
12. От чего зависит скорость роста эпитаксиального слоя?
13. Что такое легирование и автолегирование?
14. В чем состоит недостаток автолегирования?
15. Как взаимосвязаны процессы роста пленки и ее легирование?
16. Охарактеризуйте процесс молекулярно-пучковой эпитаксии.
17. Перечислите основные достоинства молекулярно-пучковой эпитаксии.
18. Охарактеризуйте процесс жидкофазной эпитаксии.
19. Сравните возможности газофазной и жидкофазной эпитаксии.
20. Перечислите возможности и назначение процесса эпитаксии из металлоорганических соединений.

3. ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ И ПАССИВИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

Защитные диэлектрические слои играют важную роль в технологии изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Такие пленки выполняют функции маскирующих, изолирующих или пассивирующих слоев и могут служить конструктивными элементами готовых микросхем.

В зависимости от назначения к диэлектрическим пленкам предъявляют различные требования. Так, *маскирующие пленки* не должны быть пористыми, так как они являются барьером для диффундирующих легирующих примесей, должны хорошо тормозить ионы при ионном легировании, а также обеспечивать получение минимального клина травления при локальном

травлении.

Изолирующие пленки также не должны иметь пор, чтобы не происходило замыкание металлизированных слоев. Они должны иметь высокие диэлектрические свойства.

Пассивирующие слои должны иметь высокую стойкость (стабильную во времени) к влажным и агрессивным средам.

Подзатворный диэлектрик должен иметь минимальный положительный заряд, высокие защитные и диэлектрические свойства.

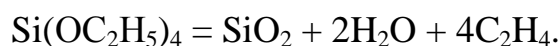
Процесс окисления кремния является наиболее важным составляющим планарно-эпитаксиальной технологии, так как позволяет создавать защитные маски за счет материала самой подложки.

Наиболее распространенными способами получения диэлектрических пленок являются следующие:

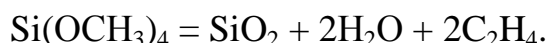
- 1) нанесение оксидных пленок с помощью пиролитического осаждения из кремнийорганических соединений;
- 2) анодное окисление кремния;
- 3) процесс газофазного осаждения с применением плазменной стимуляции процесса;
- 4) высокотемпературное окисление.

3.1. Пиролитическое осаждение

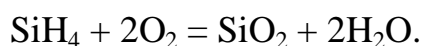
Существует два варианта пиролитического осаждения, которые нашли широкое применение при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: термическое разложение **тетраэтоксисилана** $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ или **тетраметоксисилана** $\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$ и окисление **моносилана** SiH_4 кислородом. Первый вариант осаждения может проводиться непосредственно над поверхностью подложки либо в отдельной камере, из которой продукты реакции транспортируются к подложке. Реакция разложения тетраэтоксисилана происходит при температуре $650\text{-}700^\circ\text{C}$ с выделением диоксида кремния, воды и этилена:



Альтернативным вариантом является разложение тетраметоксисилана при температуре ($800\text{-}850^\circ\text{C}$):

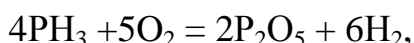


Второй вариант обладает преимуществом в том, что в случае окисления моносилана не происходит образования углеродсодержащих соединений, а сама реакция идет при более низкой температуре ($400\text{-}450^\circ\text{C}$):



Последнюю реакцию обычно используют и при осаждении фосфоросиликатного стекла (ФСС), если добавить к газовой смеси фосфин (PH_3), разбавленного азотом до 1,5%-й концентрации.

Фосфин вступает в реакцию с кислородом:



образуя оксид фосфора, который легирует SiO_2 . Если в пленке оксида кремния оказывается 1-3% фосфора, то за счет этого повышается ее термомеханическая прочность, пластичность и снижается пористость. При содержании фосфора до 8-9% слои ФСС приобретают способность к текучести, что используют для планаризации поверхности пластин, имеющих рельеф.

Процесс пиролитического осаждения слоев SiO_2 проводят в потоке газаносителя (аргона или азота) при пониженном давлении или нормальном давлении на установках типа «Изотрон». Пленки SiO_2 , полученные пиролитическим осаждением, имеют более высокую пористость, чем при термическом окислении, однако в них ниже уровень механических напряжений. Отличительным признаком пленок SiO_2 , полученных этим методом, является более высокая скорость их травления.

Достоинством пиролитического осаждения является возможность осаждать оксидные пленки кремния на подложку практически из любого материала. Другим важным преимуществом данного способа является то, что он позволяет свести к минимуму перераспределение примесей, которые были ранее введены в подложку на предыдущих этапах, то есть сохранить геометрические размеры и электрические параметры активных и пассивных областей микросхемы. Третьим достоинством способа является низкая температура процесса. Недостатком же является высокая вероятность загрязнения растущих пленок продуктами разложения и высокая пористость пленок.

На рис. 16 показана схема установки формирования пленок методом химического осаждения из газовой фазы (пиролитического осаждения) при нормальном давлении. В нагретой лодочке (подложкодержателе) горизонтально располагаются пластины. Сверху поступает газ-носитель, в атмосфере которого протекают химические реакции. Формирование пленки происходит в результате химических реакций на поверхности пластины. Для обеспечения однородности толщины пленки газ равномерно подводится к поверхности пластин. Температура по всей поверхности пластин во время осаждения должна поддерживаться одинаковой. Внутри подложкодержателя имеется полость, предназначенная для предотвращения рассеяния тепла во внешнее пространство и обеспечения равномерности температуры подложек. Процесс формирования пленок при нормальном давлении обладает рядом достоинств, к

числу которых относится более высокая, чем для других методов, скорость формирования пленок. Установки сравнительно компактны и отличаются низкой стоимостью.

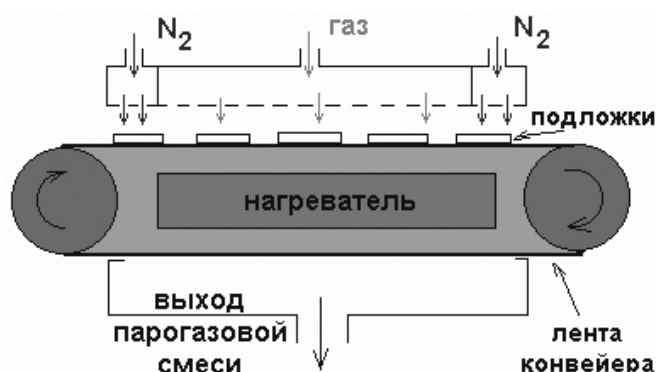


Рис. 16. Схема установки пиролитического осаждения при атмосферном давлении

Конструкция установки формирования пленок методом химического осаждения из газовой фазы при пониженном давлении показана на рис. 17.



Рис. 17. Схема установки пиролитического осаждения при пониженном давлении

Конструктивно эта установка представляет собой печь и имеет несколько реакторов с горячими стенками, работающих при пониженном давлении в режиме непрерывной откачки их объема. Нагревательный элемент состоит из трех секций. Пластины устанавливают в кассету вертикально по всей длине рабочей зоны. Газовая смесь поступает с одного конца реактора и откачивается с другого. Предельное разрежение в реакторе установки не выше $\sim 0,7$ Па, рабочее давление при напуске пирогенной смеси варьируется в пределах от 13 до 670 Па. Манометр позволяет контролировать давление в реакторе. Установка работает в автоматическом режиме, основные параметры устанавливаются на ЭВМ. В таких устройствах скорость осаждения SiO_2 составляет $0,2$ мкм/ч, а ФСС – $0,7-0,8$ мкм/ч. Наиболее важными факторами, определяющими скорость осаждения, являются: температура пластин, состав и расход газов, а также давление в реакторе.

3.2. Анодное окисление

Анодное окисление кремния осуществляют в среде электролита при воздействии на него электрического тока. Метод анодного окисления включает две модификации: окисление поверхности кремния в жидком электролите и окисление в газовой плазме. В первом случае процесс называют электролитическим анодированием, во втором – плазменным анодированием.

Процесс *электролитического анодирования* может быть описан как процесс переноса ионов кремния через границу раздела оксид-кремний к границе раздела оксид-электролит, где происходит реакция окисления. Толщина пленки при анодном окислении определяется значениями напряжения пробоя (приложенным напряжением) и величиной ионного тока. Большую роль в получении воспроизводимых результатов анодного окисления играет выбор электролита и его концентрация. Могут быть использованы самые различные электролиты на основе азотной, борной или фосфорной кислот с добавками нитрата натрия, нитрата калия, бихромата аммония и др.

Газовое (плазменное) анодирование кремния аналогично электролитическому с той лишь разницей, что вместо электролита используется ионизованный газ. Этот метод применяется при выращивании толстых оксидных пленок. Кислородная плазма, возбуждаемая полем высокой частоты, служит источником отрицательно заряженных кислородных ионов. Ионы кислорода из плазмы взаимодействуют с поверхностью кремниевой пластины. Рост оксида зависит от давления внутри реактора, температуры и плотности плазмы.

3.3. Газофазное осаждение с применением плазменной стимуляции процесса осаждения

В настоящее время широкое применение в технологии микроэлектроники находят процессы газофазного осаждения диэлектриков с применением плазменной стимуляции процесса осаждения.

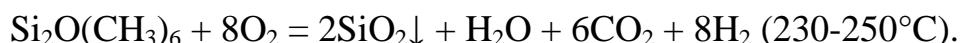
Суть плазменной стимуляции процесса осаждения покрытий из газовой фазы состоит в том, что плазма создает на поверхности подложки условия, эквивалентные высокой температуре, ускоряя процессы химического взаимодействия компонентов газовой смеси на ее поверхности.

При плазмохимическом осаждении процесс разложения кремнийсодержащих соединений активизируется высокочастотным разрядом, образующим в газовой среде при пониженном давлении низкотемпературную кислородную плазму, дожигающую органику при низкой температуре до CO_2 и H_2O , в результате чего оксидные пленки получаются более чистыми и однородными по толщине.

Механизм образования пленок при плазмохимическом осаждении состоит из следующих стадий: образования в зоне разряда радикалов и ионов,

адсорбции их на поверхности пленки оксида и перегруппировки (миграции) адсорбированных атомов. Одновременно с образованием пленки происходит десорбция продуктов реакции с поверхности.

Данным методом получают диоксид кремния, по качеству близкий к термическому окислу, но без подогрева подложки, с высокой однородностью по толщине и скоростью осаждения. В качестве источника кремния используют гексаметилдисилоксан, который в плазме кислорода разлагается с выделением SiO_2 :



Альтернативным более низкотемпературным процессом может служить реакция с силаном:



При реализации данного процесса существует возможность планаризации при осаждении пленки на подложку со сложным рельефом за счет приложения смещения к подложкодержателю и одновременного распыления пленки в процессе осаждения, приводящего к сглаживанию рельефа. Так же, по сравнению с пиролитическим осаждением температура процесса еще более низкая, а вероятность загрязнения растущих пленок продуктами разложения кремнийорганики меньше.

Плазмохимическое осаждение обычно проводят при давлении в реакционной камере 66-660 Па и частоте ВЧ-разряда 13,56-40 МГц в установках типа УВП-2М и УВП-4АМ. Скорость осаждения SiO_2 при этом методе составляет от 0,1 до 10 мкм/ч. Пленки имеют самый низкий уровень механических напряжений (по сравнению с другими методами). Однако у них большая дефектность и остаточный заряд.

Не менее распространенным процессом получения SiO_2 в технологии изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем является *термическое окисление кремния*, при котором защитные диэлектрические пленки получают при нагревании исходных кремниевых подложек в окислительной среде. Термическое окисление кремния проводят в парах воды, сухом кислороде и во влажном кислороде.

Метод позволяет получать высококачественные маскирующие пленки, равномерные по толщине и структуре и обладающие высокими защитными и диэлектрическими свойствами. По сравнению с пиролитическим осаждением, у пленок, получаемых высокотемпературным окислением, выше уровень механических напряжений, однако пористость пленки существенно ниже. Основным недостатком термического окисления является высокая температура процесса, которая может привести к дефектообразованию на поверхности пластин, короблению пластин, а также к изменению параметров ранее

сформированных диффузионных и ионно-имплантированных слоев.

3.4. Высокотемпературное окисление кремния

Основным назначением пленки оксида кремния является создание маски, которая используется при проведении диффузионных процессов, а также при травлении технологических слоев. Важно отметить, что молекулы SiO₂ при термическом окислении образуются в приповерхностном слое кремниевой пластины, вследствие чего приблизительно 40% толщины оксидной пленки образуется за счет материала самой пластины.

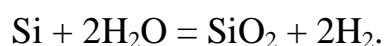
Кремний имеет высокое сродство к кислороду, поэтому на воздухе он всегда покрывается окисной пленкой в несколько десятков нанометров. Однако этой толщины слоя SiO₂ оказывается недостаточно для создания надежных масок, поэтому в технологии применяют специальные приемы стимуляции роста слоя оксида.

Различают:

1. Высокотемпературное окисление в парах воды.
2. Высокотемпературное окисление в сухом кислороде.
3. Высокотемпературное окисление во влажном кислороде.
4. Окисление при высоком давлении в условиях повышенных температур.
5. Окисление в присутствии галогенов при повышенной температуре.

3.4.1. Термическое окисление кремния в парах воды

Для получения защитных диэлектрических пленок на кремнии используют термическое окисление в парах воды высокой степени чистоты. Структурное формирование пленки оксида происходит за счет диффузионного переноса воды через слой оксида к поверхности кремния. Основная химическая реакция окисления кремния в данном случае записывается следующим образом:

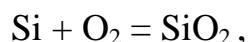


В этом случае на качество пленки оксида оказывает влияние водород, образующийся в процессе реакции окисления и диффундирующий через растущую пленку SiO₂ к поверхности пластины. Так как коэффициент диффузии водорода ($2 \cdot 10^{-6}$ см²/с при 1050°C) значительно больше, чем коэффициент диффузии молекул воды при этой же температуре ($1 \cdot 10^{-11}$ см²/с), то образующийся слой SiO₂ далек от структурного совершенства: пленка получается «рыхлой», что сказывается на ее плотности (на уровне 2 г/см³, в отличие от величины плотности 2,27 г/см³, получаемой при окислении кремния в сухом кислороде). Тем не менее, такой процесс часто используется для

быстрого наращивания слоя SiO₂ за счет высокой скорости этого процесса (примерно 0,8-1 мкм/час). Высокая скорость процесса окисления кремния в парах воды позволяет использовать в среднем более низкие температуры (950-1050°С), чем в случае окисления кремния в сухом кислороде.

3.4.2. Термическое окисление кремния в сухом кислороде

Отличие данного процесса от окисления в парах воды заключается в использовании очищенного кислорода в качестве окислителя:



таким образом, диффундирующим сквозь растущую пленку оксида является не вода, а кислород. Коэффициент диффузии кислорода в пленке оксида ($2,8 \cdot 10^{-14}$ см²/с при 1050°С) значительно меньше, чем у водорода и воды при тех же условиях. Поэтому скорость роста оксидной пленки в сухом кислороде меньше, чем в парах воды и составляет 0,04-0,06 мкм/ч. Однако качество пленки оказывается существенно выше: больше плотность пленки (2,27 г/см³), ниже пористость и дефектность. Так как в данном случае при образовании оксидной пленки отсутствуют водород и пары воды, то в структуре выращенного оксида нет гидроксильных групп (ОН⁻). Отсутствие этих групп приводит к образованию прочных связей кислорода с кремнием в структуре получаемого оксидного слоя.

На процесс роста пленки существенным образом влияет наличие зарядовых состояний в системе Si-SiO₂. Их обычно разделяют на несколько групп:

- а) заряды на границе раздела Si-SiO₂;
- б) фиксированные заряды в окисле вблизи поверхности полупроводника;
- в) подвижные примесные ионы в окисле;
- г) заряды на ловушках в объеме окисла.

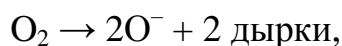
Заряды, локализованные на границе раздела окисел-кремний, возникают в запрещенной зоне вблизи поверхности полупроводника вследствие нарушения периодичности решетки. Очевидно, что их плотность должна быть приблизительно равна плотности атомов на поверхности, т.е. на уровне 10^{15} см⁻².

Фиксированные заряды в окисле вблизи поверхности полупроводника локализуются на расстоянии ~20 нм от границы Si-SiO₂. Фиксированные заряды не могут нейтрализоваться или перемещаться, их величина сильно зависит от условий окисления, отжига и ориентации кристалла. Причиной образования фиксированных зарядов являются избыточные ионы кремния в окисле.

Подвижные заряды ионов в окисном слое представлены в первую очередь ионами Na^+ , Li^+ , K^+ . Эти заряды вызывают дрейф характеристик МОП-приборов при приложении напряжения, от которых необходимо избавляться на операциях комплексной очистки подложек.

В окисле возможно возникновение встроенных положительных пространственных зарядов на ловушках, например, при воздействии внешнего облучения (рентгеновских лучей, электронов). Радиационно-стимулированные заряды в окисле отжигаются при относительно низких температурах (порядка 300°C).

Механизм влияния зарядовых состояний на скорость роста окисной пленки, по данным ряда исследований, может быть представлен следующим образом. До сих пор предполагалось, что вещество окислителя, проникающее через окисел, нейтрально. Однако исследования показали, что окислитель (O_2) имеет отрицательный заряд. Возможно, что молекула кислорода при внедрении в окисел диссоциирует по общей схеме:



после чего связанная электрическим полем пара «ион кислорода-дырка» диффундирует через окисел по механизму амбиполярной диффузии.

3.4.3. Термическое окисление кремния во влажном кислороде

Процесс окисления кремния во влажном кислороде представляет собой комбинацию двух ранее рассмотренных процессов окисления: в парах воды и в сухом кислороде. Сухой и очищенный от примесей кислород пропускают через водный питатель, где он насыщается горячими водяными парами и затем подается в рабочую камеру. Содержание влаги в потоке кислорода определяется температурой питателя и скоростью потока кислорода.

Так как скорость образования оксидного слоя в парах воды значительно выше, чем в сухом кислороде, то скорость процесса окисления кремния зависит от содержания влаги в потоке кислорода.

Основным достоинством данного процесса является то, что он позволяет легко изменять концентрацию паров воды в потоке кислорода и варьировать скорость окисления от значения, соответствующего 100%-му содержанию кислорода, до значения, соответствующего 100%-му содержанию паров воды. В данном методе в качестве окислителя служит смесь кислорода и паров воды, причем соотношение этих компонентов можно изменять в широких пределах. Если необходимо уменьшить скорость процесса окисления, то вместо кислорода можно использовать поток аргона или азота.

В зависимости от назначения получаемой пленки термическое окисление проводят в несколько этапов. Как правило, процесс окисления начинают в сухом кислороде, при этом формируется практически бездефектная сплошная

равномерная пленка. Основную толщину пленки оксида кремния получают в парах воды или в увлажненном кислороде. Заканчивают процесс окисления снова в сухом кислороде. При этом дефекты окисления во влажном кислороде «затягиваются», и пленка приобретает удовлетворительные защитные свойства.

Хорошо окисленная пластина имеет равномерный желтовато-бурый (золотисто-рыжий) оттенок. Наличие на поверхности радужных оттенков говорит о различной толщине пленки оксида по площади пластины и является браком, причиной которого может служить отклонение температурного профиля процесса от нормативного.

Кинетика процесса термического окисления обычно включает следующие стадии:

1. Адсорбцию окислителя на поверхности пластины.
2. Диффузию частиц окислителя к границе раздела Si-SiO₂.
3. Химическое взаимодействие окислителя с кремнием с образованием SiO₂ и в случае присутствия влаги с образованием H₂, как продукта реакции.
4. Диффузию газообразных продуктов реакции окисления кремния через слой SiO₂ к поверхности пластины.
5. Десорбцию и удаление с газовым потоком продуктов окисления кремния.

На рис. 18 показана схема, отражающая стадии окисления кремния в парах воды (в увлажненном кислороде).

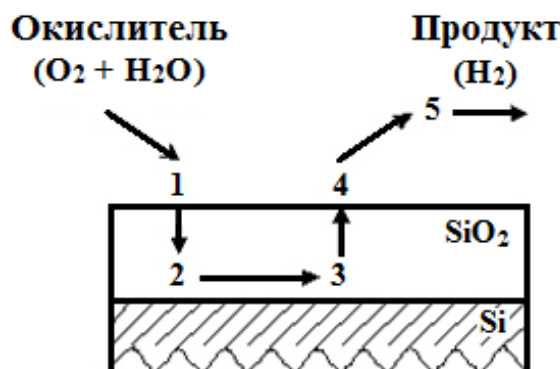


Рис. 18. Кинетика процесса термического окисления в парах воды (в увлажненном кислороде)

Скорость окисления определяется скоростью самой медленной стадии. Общий характер процесса термического окисления кремния может быть представлен кинетической кривой $d=f(t)$ (при постоянной температуре), где d – толщина пленки оксида; t – время (рис. 19).

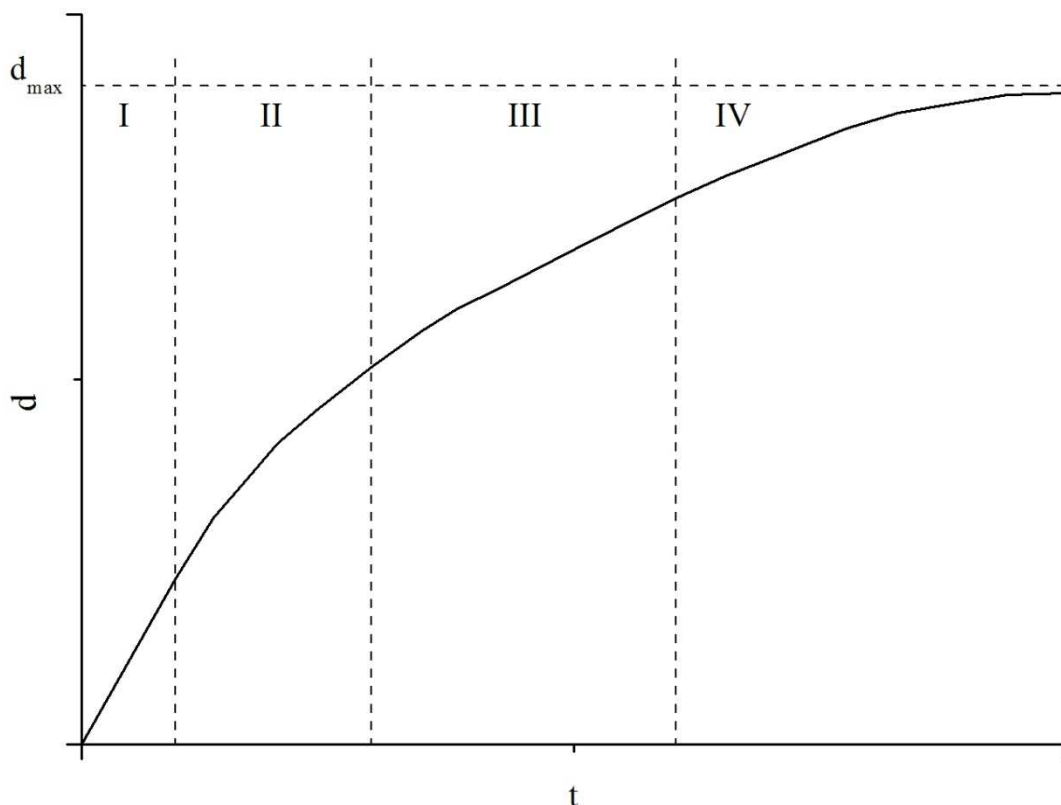


Рис. 19. Кинетическая кривая термического окисления кремния

Условно кривая рис. 19 может быть разбита на четыре участка. Участок *I*, соответствующий начальному периоду окисления, описывается линейной функцией $d=kt$ (k – константа). Скорость роста пленки на этом этапе процесса постоянна и определяется скоростью адсорбции окислителя на поверхности кремния.

По мере роста пленки все большую роль начинает играть диффузия окислителя через окисную пленку к границе раздела Si-SiO_2 . Поэтому на участке *II* линейная зависимость сменяется линейно-параболической $d^2+cd=kt$ (c – численный коэффициент), которая определяется конкуренцией поверхностной реакции и диффузии. Относительный вклад этих процессов на участке *II* определяется коэффициентом « c » (его возрастание соответствует увеличению вклада поверхностной реакции).

На участке *III* преимущественный вклад дает диффузия окислителя через растущую пленку оксида, для которого кинетическая кривая соответствует параболическому закону $d^2=kt$. Этот закон, вытекающий из линейно-параболического при $c=0$, отвечает случаю отсутствия вклада в кинетику процесса поверхностной реакции. При дальнейшем росте пленки диффузия окислителя через слой оксида затрудняется, и скорость роста начинает убывать заметнее, чем на предыдущих участках.

На участке *IV* кинетическая кривая приближается к некоторому предельному значению d_{max} , характерному для данной температуры, и

параболический закон сменяется параболически-логарифмическим $d=k'lg(1+c_1t)+c_2t^{1/2}$, где (k',c_1,c_2 – константы), а затем логарифмическим законом при $c_2=0$, $d=k'lg(1+c_1t)$.

Таким образом, термическое окисление кремния в технологически приемлемых интервалах температуры и времени (в проточных системах) приводит к образованию пленок предельной толщины. Так, при температуре порядка 1200°C невозможно получить термический окисел на кремнии толщиной более 1,5 мкм. Реальный процесс термического окисления, как показано выше, протекает очень сложным образом, кинетика меняется на протяжении всего процесса окисления с двумя конкурирующими между собой основными стадиями: диффузией химически-активного компонента и непосредственно химической реакцией.

Однако существует некоторое эмпирическое правило, которым можно пользоваться при практическом осуществлении технологического процесса окисления кремния. Если считать, что давление окислителя отличается от атмосферного не более чем в 10 раз, а температура T строго поддерживается выше 1000°C , то после формирования слоя диоксида кремния толщиной более 0,01 мкм зависимость его толщины x от времени t может быть представлена в общем виде следующим образом:

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

где e – основание натурального логарифма; A – коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров проведения процесса и типа химически-активных частиц; ΔE – энергия активации процесса, зависящая от физико-химических свойств окислителя и окисляемого вещества; k – постоянная Больцмана. Энергии активации для процесса окисления кремния в сухом кислороде составляет $\Delta E(O_2) = 1,33$ эВ, а для окисления в парах воды $\Delta E(H_2O) = 0,8$ эВ.

Как правило, процесс термического окисления осуществляется при атмосферном давлении в реакторе типа «открытая труба» в диффузионных однозонных системах (СДО), объединенных в составе автоматизированных диффузионных систем (АДС-3-150, например). Здесь 3 – означает количество каналов одновременного окисления полупроводника, а 150 – диаметр пластин в мм. Основным типом брака при термическом окислении кремния на подобных установках является возникновение на поверхности пластин фигур скольжения (рис. 20) и так называемых «шипов» (рис. 21). Оба этих типа брака являются неустраняемыми и являются следствием неравномерного прогрева пластин или их перегрева.

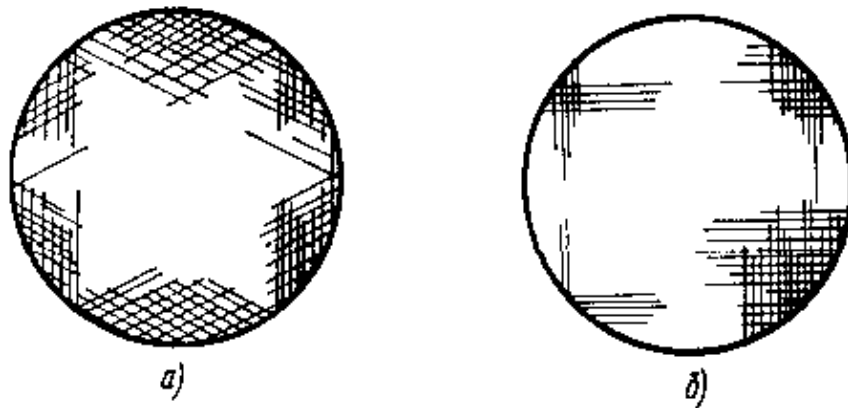


Рис. 20. Линии скольжения на кремниевых пластинах после термической обработки: а – Si (111); б – Si (100)

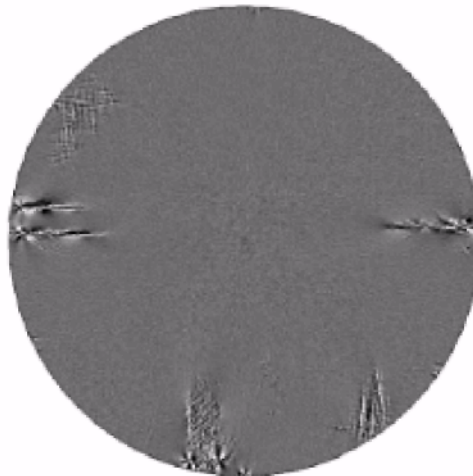


Рис. 21. Шипы на полупроводниковой пластине, как предельный случай проявления температурных дефектов на их поверхности

3.4.4. Термическое окисление кремния при повышенном давлении и в галогеносодержащих средах

Окисление полупроводниковых пластин при высоком давлении позволяет получать оксиды при относительно низких температурах за время, соизмеримое со временем обычного высокотемпературного процесса при атмосферном давлении.

При повышении давления в реакционной камере возрастает концентрация молекул окислителя, что приводит к увеличению скорости роста пленки. Для окисления под давлением используют установку «Термоком», в которой имеется камера высокого давления из нержавеющей стали со встроенными в нее резистивным нагревателем и кварцевым реактором. Пластины обрабатывают при температуре 700-1100°C и давлении до 2 МПа. При высокой температуре время выращивания слоя оксида значительно сокращается, пленки

оксида имеют более высокие, чем выращенные при атмосферном давлении, коэффициент преломления ($n = 1,48$) и плотность ($\rho = 2,4 \text{ г/см}^3$). Статический заряд, состав и структура молекул оксида существенных различий не имеют.

Если в парогазовую смесь ввести галогены, то свойства слоя оксида улучшаются (снижается пористость, повышаются диэлектрические свойства), дефектность кремния под оксидом уменьшается (снижается плотность дефектов), скорость роста пленки увеличивается. Обычно используют следующие парогазовые смеси: газообразный HCl и сухой O₂; газообразный HCl, сухой O₂ и пары H₂O. Увеличение концентрации хлора, как показывают исследования в этой области, способствует созданию напряжения в решетке SiO₂, вследствие чего облегчается диффузия окислителя через пленку. В этом случае при окислении применяют специальные дозаторы, которые позволяют тонко регулировать концентрацию хлор-парогазовой смеси и сохранять ее состав неизменным до конца процесса.

3.5. Факторы, влияющие на скорость роста пленки при окислении кремния

- 1. Давление в системе.** Так повышение давления всегда приводит к увеличению скорости роста пленки SiO₂.
- 2. Температура.** Для окисления кремния обычно выбирают температуру из следующего температурного интервала 900-1200°C. Так, при температуре 900°C коэффициент диффузии окислителя в подложку кремния достаточно мал, через каждые 100°C коэффициент увеличивается примерно в пять раз. Слишком высокие температуры, свыше 1200°C, повреждают созданные в кремнии структуры и даже могут начать плавить сам кремний (могут образовываться шипы – своеобразные складки на поверхности пластины). При температурах процесса окисления выше 1100°C образование слоя оксида идет согласно параболическому закону и описывается выражением $d^2=kt$. При температурах процесса ниже 1100°C кинетика роста пленки отличается от параболического и имеет вид $d^2+cd=kt$.
- 3. Кристаллографическая ориентация исходных пластин.** Так, на пластинах с ориентацией (111) скорость роста пленки в среднем всегда выше, чем на пластинах с другой ориентацией, даже при низких температурах, а вот при предельных температурах (1200°C) скорость выравнивается для пластин с любой кристаллографической ориентацией.
- 4. Тип электропроводности и концентрация примеси в исходной подложке.** Высокая концентрация примеси в подложке влияет либо на скорость реакции окисления на границе раздела кремний-оксид, либо на коэффициенты диффузии окислителей. Так, наличие в исходной подложке фосфора в первую очередь оказывает влияние на скорость реакции окисления. Поверхность кристалла с высокой концентрацией

фосфора окисляется значительно быстрее, чем слаболегированная поверхность. Для бора картина обратная.

5. **Наличие тяжелых и крупных атомов, входящих в состав основного окислителя.** На практике используют HCl, при этом на поверхности пластины происходит распад этой молекулы, и крупный атом хлора внедряется в кристаллическую решетку оксида кремния, деформируя ее, чем облегчает диффузию основного окислителя.
6. **Влажность окислителя.** Как отмечалось ранее, оксид, выращенный в атмосфере сухого кислорода, имеет более совершенную структуру пленки, но малую скорость ее роста. Оксид, выращенный в атмосфере влажного кислорода или паров воды, имеет менее совершенную структуру, но растет быстрее. В увлажненном кислороде же получают нечто среднее. Так, например, в производственных условиях при окислении в сухом кислороде при $T=1000^{\circ}\text{C}$ пленки SiO_2 толщиной 0,5 мкм получают в течение 30 часов, а в парах воды, при этой же температуре, в течение 48 минут.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Тема. Высокотемпературное окисление кремния

Цель работы

1. Изучить основные виды процессов высокотемпературного окисления кремниевых подложек.
2. Изучить кинетику процесса высокотемпературного окисления кремниевых подложек.
3. Определить толщину тонких пленок диоксида кремния, выращиваемых в увлажненном кислороде.

Применяемые материалы

1. Кислота плавиковая.
2. Вода дистиллированная (бидистиллят).
3. Тoluол.
4. Ацетон.
5. Влагостойкий лак.
6. Бумага фильтровальная.
7. Вата медицинская гигроскопическая.
8. Пластины кремниевые *n*- или *p*-типа.

Оборудование, инструменты, приспособления и контрольно-измерительная аппаратура

1. Чашка керамическая.
2. Чашка стеклянная.
3. Палочка стеклянная
4. Пинцет пластиковый.
5. Установка высокотемпературного окисления (рис. 22).
6. Микроинтерферометр Линника МИИ-4М (рис. 24).
7. Оптический микроскоп.
8. Сушильный шкаф.

Задание и ход выполнения работы

Домашняя работа:

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить необходимые экземпляры таблиц для занесения результатов лабораторных испытаний.
3. Изучить теоретические сведения.
4. Подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

Последовательность работы в лаборатории

1. Подготовка пластин кремния к окислению.
2. Окисление поверхности кремниевых пластин.
3. Определение толщины оксидного слоя.

Порядок выполнения работы

1. Подготовка пластин кремния к окислению

- 1.1. Очистить поверхность образцов: при наличии на них загрязнений, последовательно в жирном растворителе (бензол, толуол, орто-ксилол или т.п.), а затем в ацетоне, используя при этом протирочную ветошь (вату) и пинцет, не допуская касаний поверхности пластины руками. Чистые образцы переносить на фильтровальной бумаге.
- 1.2. Высушить образцы на воздухе или в сушильном шкафу до полного их высыхания. Поверхность чистой сухой пластины должна быть без разводов и следов от остатков растворителей. Произвести химическую очистку пластин кремния – поместить образцы на 8-10 минут в 4% раствор плавиковой кислоты.
- 1.3. Обильно промыть образцы сначала в воде водопроводной, затем в дистиллированной.

- 1.4. Высушить образцы на воздухе или в сушильном шкафу до полного их высыхания.

2. Окисление поверхности кремниевых пластин

Процесс окисления поверхности кремниевых пластин проводится на установке высокотемпературного окисления, представленной на рис. 22.

Порядок выполнения работы на установке

- 2.1. Включить генератор кислорода и печь в сеть 220 В.
- 2.2. При помощи переключателя режимов 14 выбрать необходимый температурный режим (рис. 22).
- 2.3. Дать прогреться печи необходимое время, которое выбирается по данным рис. 23.
- 2.4. За 15 минут до загрузки образцов в печь проверить наличие достаточного количества воды в бачке генератора кислорода, открутив пробку 3. При необходимости добавить воду из емкости с дистиллированной водой и закрутить пробку.
- 2.5. Убедиться в целостности газовой магистрали 7. На шланге не должно быть перегибов.
- 2.6. Включить генератор кислорода «Кулон-б» кнопкой питания 5, при этом начнет светиться индикатор 6 и на цифровом индикаторе 2 появятся цифры.
- 2.7. Нажав и удерживая кнопку отображения расхода кислорода 1 (на цифровом дисплее появится значение расхода), убедиться, что значение равно заданному преподавателем (рекомендуемый расход 4,00 л/ч). Если оно не удовлетворяет данному, то задатчиком давления 4 отрегулировать расход кислорода.
- 2.8. После прогрева печи поместить лодочку 12 с образцами в середину кварцевой трубки 10.
- 2.9. Окислять образцы необходимое время и следить за показаниями цифрового индикатора 2, они должны быть в пределах 0,00 – 1,00. В противном случае необходимо найти и устранить перегиб шланга подачи кислорода. Если перегиба нет, но давление продолжает расти, то необходимо отключить генератор кислорода «Кулон-б» кнопкой питания 5 и медленно, откручивая пробку бачка воды 3, спустить накопившееся давление.
- 2.10. После процесса окисления все оборудование выключить в обратном порядке и спустить давление из бачка генератора кислорода.

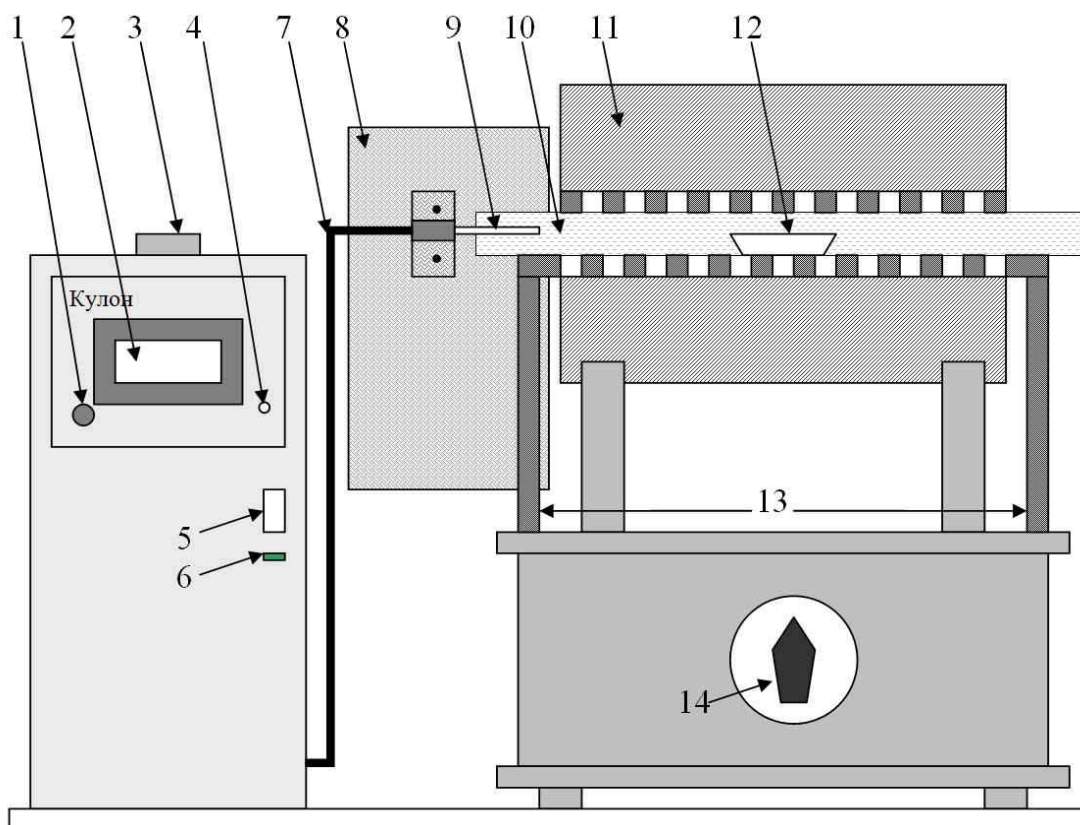


Рис. 22. Установка высокотемпературного окисления.

Генератор водорода «Кулон-6»:

1 – кнопка отображения расхода кислорода; 2 – цифровой индикатор; 3 – пробка бачка с дистиллированной водой; 4 – датчик давления газа на выходе газовой магистрали; 5 – кнопка питания генератора; 6 – индикатор работы генератора; 7 – газовая магистраль кислорода.

Печь для окисления кремния:

8 – защитный кожух; 9 – дозатор подачи кислорода; 10 – кварцевый реактор открытого типа; 11 – корпус печи; 12 – керамическая лодочка с образцами кремния; 13 – мост подачи напряжения на нагревательный элемент; 14 – переключатель режимов работы печи

Установка высокотемпературного окисления кремния представляет собой два основных узла: генератор увлажненного кислорода «Кулон-6» и муфельная печь, в которой располагается кварцевый реактор для окисления кремниевых пластин (рис. 22).

Технические характеристики генератора:

- производительность – не менее 6 л/ч;
- давление газа на выходе магистрали – 0,1 МПа;
- объем заливаемой дистиллированной воды – 1,5 л;
- электропитание 220 В переменного тока;

- частота – 50 Гц;
- мощность – не более 100 Вт;
- условия эксплуатации – лабораторные (возможен круглосуточный режим работы).

Резистивная печь выполнена в настольном исполнении. Увлажненный кислород во время процесса окисления поступает через газовую магистраль 7 в кварцевый реактор 10 посредством дозатора 9 (рис. 22). Температура в реакторе задается при помощи переключателя режимов работы печи 14, имеющего девять диапазонов. Временной температурный профиль работы нагревателя печи для каждого из девяти диапазонов представлен на рис. 23.

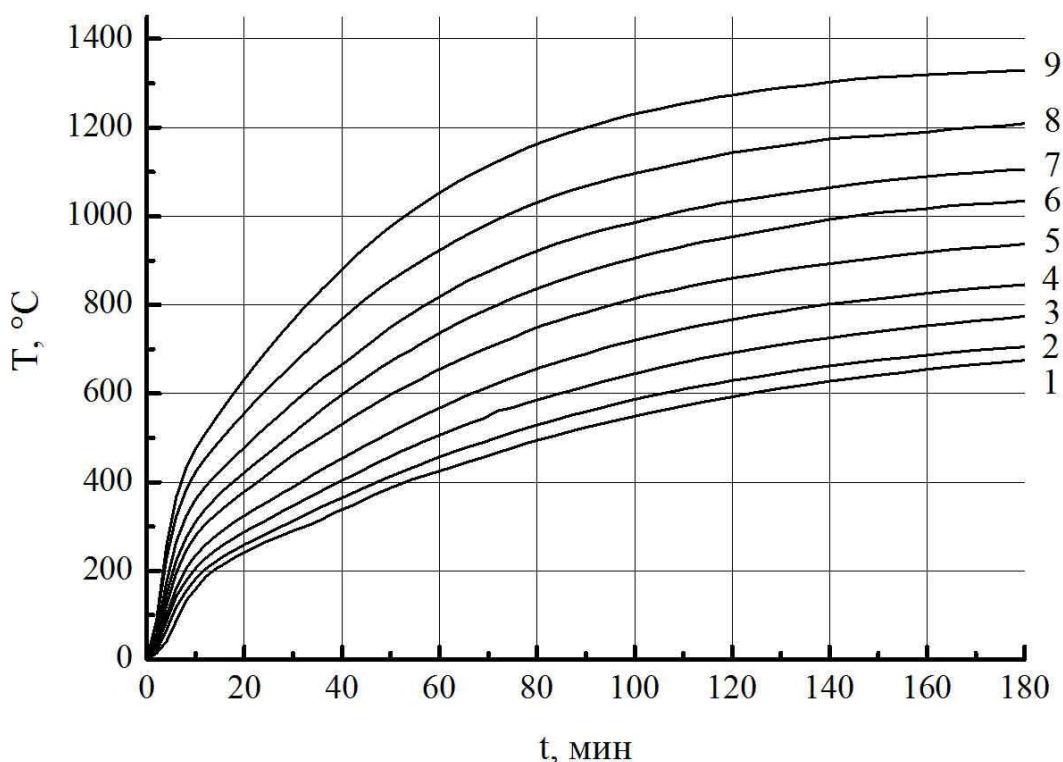


Рис. 23. Зависимость роста температуры в кварцевом реакторе от времени прогрева печи (1-9 – режимы работы печи)

3. Определение толщины оксидного слоя

Определение толщины пленки осуществляется на микроинтерферометре Линника МИИ-4М, так как для прозрачных тонких диэлектрических пленок при падении на них света наблюдаются интерференционные явления.

Микроинтерферометр Линника МИИ-4М предназначен для визуальной оценки и измерения высоты неровностей поверхностей. Принцип действия прибора основан на явлении интерференции света. Для получения систем волн, способных интерферировать, пользуются разделением светового пучка, исходящего из одной точки источника света, на наклонной плоскопараллельной

пластинке с полупрозрачным покрытием. Внешний вид микроинтерферометра Линника МИИ-4М показан на рис. 24.

При работе микроинтерферометра при помощи двух микрометрических винтов 7 столик 6 можно перемещать в двух взаимно перпендикулярных направлениях; величину перемещения столика отсчитывают по шкалам барабанов винтов. Столик можно также поворачивать вокруг вертикальной оси и закрепить в нужном положении винтом 8. Фокусировка микроинтерферометра на объект осуществляется перемещением головки микроинтерферометра при вращении микрометрического винта 3. Величина вертикального перемещения головки микроинтерферометра отсчитывается по шкале микрометрического винта. Изменение направления полос производится вращением кольца 10 вокруг интерференционной головки. Ширина полос изменяется вращением винта 11 вокруг оси. Рукоятка 9 служит для включения шторки. При включенной шторке лучи не попадают в объектив; в этом случае с микроинтерферометром можно работать как с металлографическим микроскопом. На торце рукоятки 9 нанесена стрелка, указывающая положение шторки: положение стрелки «↑» соответствует режиму микроскопа; положение стрелки «←» соответствует режиму микроинтерферометра.

Подготовка образцов

- 3.1. Взять окисленную пластину кремния пинцетом и наполовину окунуть в емкость с лаком на несколько секунд.
- 3.2. Вместе с пинцетом поместить пластину в сушильный шкаф на 5 минут при температуре 60-80°C.
- 3.3. Повторить пункты 3.1-3.2.
- 3.4. Поместить пластину в емкость с 45%-м раствором плавиковой кислоты (HF) на 25-30 секунд. При более длительном времени обработки граница окисленной и неокисленной областей может быть широко размыта, что затруднит процесс определения толщины окисленного слоя.
- 3.5. Обильно промыть образцы сначала в водопроводной, а затем в дистиллированной воде.
- 3.6. Тщательно смыть слой лака ацетоном с половины пластины.
- 3.7. Промыть образец в дистиллированной воде и высушить в течение 10 минут в сушильном шкафу.

Порядок выполнения работы на микроинтерферометре МИИ-4М

- 3.1. Включить блок питания 1 (рис. 24).
- 3.2. Включить фотоэлектрический окулярный микрометр 4 в сеть.
- 3.3. Установить образец исследуемой поверхностью вниз на предметный столик 6 так, чтобы луч света попадал в область границы

раздела Si-SiO₂.

- 3.4. Повернуть рукоятку 9 так, чтобы стрелка на ней стояла вертикально вверх («↑») (режим работы – микроскоп).
- 3.5. Сфокусировать микроинтерферометр на резкое изображение исследуемой поверхности с помощью микрометрического винта 3.
- 3.6. При помощи двух микрометрических винтов 7 передвигать предметный столик с образцом, пока в окуляре 4 не будет видна граница раздела Si-SiO₂.
- 3.7. Ослабить винт 8 и повернуть столик так, чтобы граница раздела Si-SiO₂ была параллельна горизонтальной линии в окуляре 4 (рис. 25).
- 3.8. Найти наиболее резкий переход области Si-SiO₂ и перевести прибор в режим работы «микроинтерферометр». Для этого необходимо повернуть рукоятку 9 так, чтобы стрелка на ней была в горизонтальном положении («←»). В поле зрения должны быть видны интерференционные полосы. Если интерференционные полосы не видны, немного вращая микрометрический винт 3, можно добиться их появления в поле зрения.
- 3.9. С помощью кольца 10 установить интерференционные полосы вертикально (перпендикулярно границе раздела Si-SiO₂) (рис. 26).
- 3.10. Интервал между интерференционными полосами можно изменять с помощью винта 11.
- 3.11. При правильной настройке микроинтерферометра в его поле зрения должны быть одновременно видны исследуемая поверхность и интерференционные полосы, сдвинутые в месте границы раздела Si-SiO₂ (рис. 26). Для определения величины неровности (толщины пленки) необходимо измерить величину интервала между полосами, величину сдвига полос и вычислить высоту неровности.
- 3.12. Величина интервала между полосами и сдвига полосы в месте границы раздела Si-SiO₂ выражается числом делений шкалы барабана винтового окулярного микрометра 4.
- 3.13. Среди цветных интерференционных полос, наблюдаемых в поле зрения окуляра при использовании белого света, выбрать одну полосу (на окисленной области пластины), лучше темного цвета (коричневую, темно-синюю, темно-фиолетовую) и выставить пунктирную вертикальную линию на ее середину. Произвести отсчет N₁ по шкале фотоэлектрического окулярного микрометра б и занести результаты в табл. 10.
- 3.14. Переместить пунктирную вертикальную линию на середину той же полосы в месте ее сдвига на область чистого кремния. Это будет полоса того же цвета, но в кремнии. Произвести отсчет N₂. Величина сдвига в делениях шкалы микрометра составит (N₂ – N₁).
- 3.15. Переместить пунктирную вертикальную линию на середину следующей полосы и произвести отсчет N₃. Интервал между

полосами в делениях шкалы микрометра составит ($N_3 - N_1$).

3.16. Повторить для других полос пункты 3.13-3.15 пять раз. Результаты измерений занести в табл. 10. При использовании монохроматического света процедура измерений та же.

3.17. Рассчитать толщину пленки:

– в случае белого света:

$$d = 0.27 \cdot \frac{N_2 - N_1}{N_3 - N_1} \text{ мкм};$$

– в случае монохроматического:

$$d = 0.5 \cdot \lambda \cdot \frac{N_2 - N_1}{N_3 - N_1} \text{ мкм};$$

где λ – длина волны светофильтра (0,527 мкм для зеленого и 0,588 мкм для желтого светофильтров).

Отметить характерный цвет оксидной пленки, результаты измерений и расчетов занести в табл. 10.

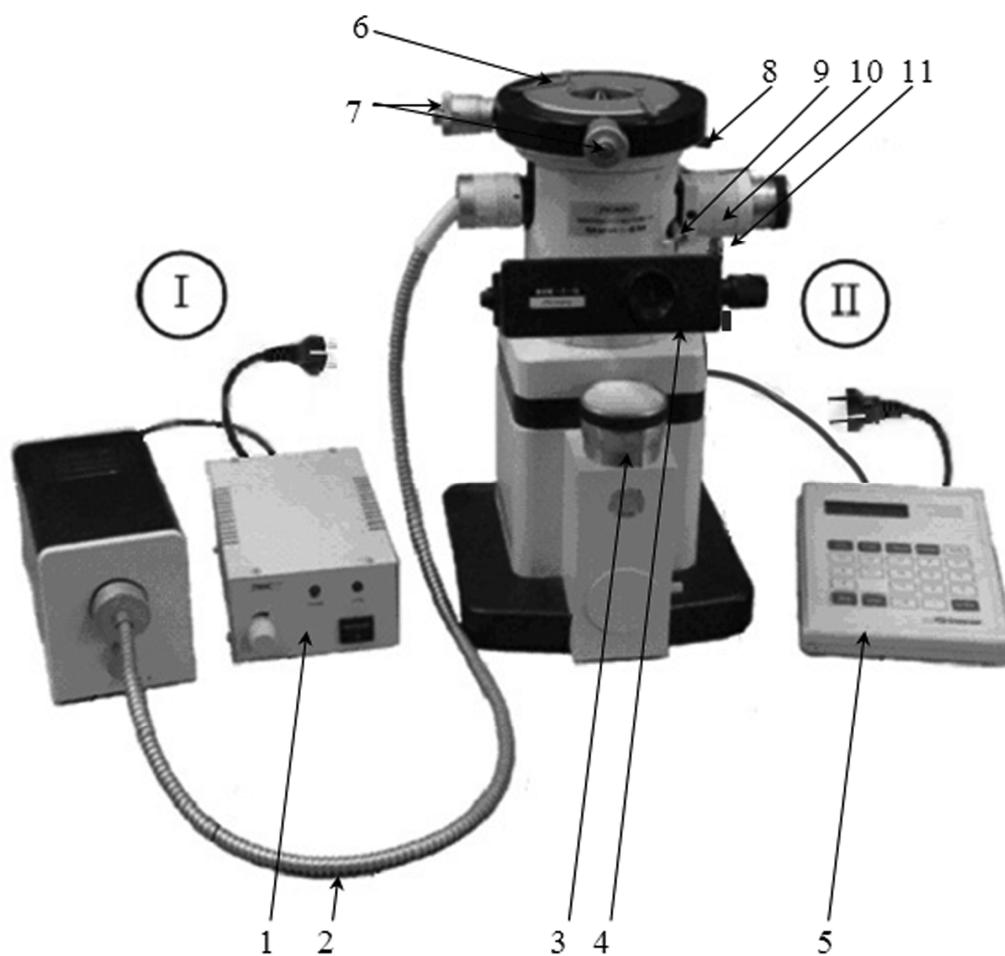


Рис. 24. Конструкция микроинтерферометра МИИ-4М:

I. Осветитель:

1 – блок питания осветителя; 2 – волоконно-оптический жгут.

II. Микроинтерферометр:

3 – механизм точной фокусировки (микрометрический винт);
 4 – фотоэлектрический окулярный микрометр ФОМ-2-16; 5 – блок управления фотоэлектрического окулярного микрометра; 6 – предметный столик; 7, 8 – винты перемещения предметного столика; 9 – шторка;
 10 – кольцо для изменения направления полос; 11 – винт изменения ширины ПОЛОСЫ

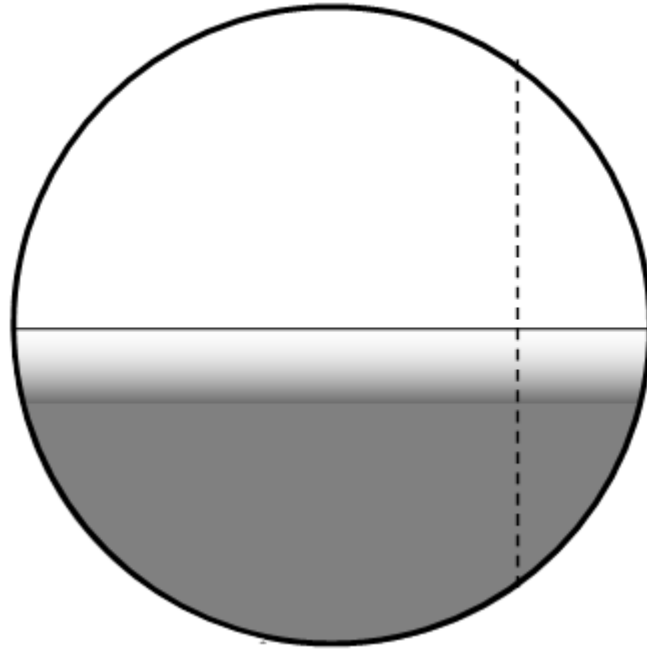


Рис. 25. Изображение границы перехода Si-SiO₂ в режиме работы «микроскоп»



Рис. 26. Изображение границы перехода Si-SiO₂ в монохроматическом свете в режиме работы «микроинтерферометр»

Существует еще один способ определения толщины пленок SiO_2 методом цветных оттенков Ньютона (см. прил. 1).

Таблица 10

Результаты эксперимента

Номер п/п	N_1 , дел. шкалы	N_2 , дел. шкалы	N_3 , дел. шкалы	d , мкм
1				
2				
3				
4				
5				
Цвет окисла –				$D_{cp} =$ мкм

Контрольные вопросы к разделу "Процессы формирования защитных и пассивирующих покрытий"

1. Какие функции могут выполнять диэлектрические пленки?
2. Какие требования предъявляют к диэлектрическим плёнкам в зависимости от назначения?
3. Назовите наиболее распространенные способы получения диэлектрических пленок.
4. Назовите способы получения оксидных пленок кремния.
5. Какие основные функции выполняют оксидные пленки кремния?
6. В чем суть высокотемпературного окисления кремния в сухом кислороде?
7. В чем суть высокотемпературного окисления кремния в парах воды?
8. В чем суть высокотемпературного окисления кремния во влажном кислороде?
9. Сравните методы высокотемпературного окисления кремния в сухом кислороде и высокотемпературного окисления кремния в парах воды с точки зрения скорости роста оксидной пленки кремния.
10. Сравните методы высокотемпературного окисления кремния в сухом кислороде и высокотемпературного окисления кремния в парах воды с точки зрения качества получаемой оксидной пленки кремния.
11. Поясните, в чем заключается основное достоинство метода высокотемпературного окисления кремния во влажном кислороде?
12. По каким признакам можно определить, что в процессе окисления получена качественная пленка?

13. Поясните, в чем заключается кинетика процесса термического окисления кремния?
14. Проанализируйте кинетическую зависимость процесса термического окисления кремния.
15. Поясните, каким образом давление в системе влияет на скорость роста оксидной пленки?
16. Поясните, каким образом температура влияет на скорость роста оксидной пленки?
17. Поясните, каким образом кристаллографическая ориентация подложки влияет на скорость роста оксидной пленки?
18. Поясните, каким образом тип электропроводности и концентрация примеси исходной подложки влияют на скорость роста оксидной пленки?
19. Поясните, каким образом наличие тяжелых и крупных атомов в основном окислителе влияют на скорость роста оксидной пленки?
20. Поясните, каким образом влажность окислителя влияет на скорость роста оксидной пленки?

4. ПРОЦЕССЫ СОЗДАНИЯ ТОПОЛОГИИ МИКРОРЕЛЬЕФА В ТЕХНОЛОГИИ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Основным процессом создания топологии будущих микросхем является литография. В общем случае, *литография* – это процесс формирования в чувствительном слое, нанесенном на поверхность подложек, рельефного рисунка, повторяющего топологию полупроводниковых приборов или интегральных микросхем (ИМС), и последующего переноса этого рисунка на подложки.

Чувствительным называется слой, который изменяет свои свойства (растворимость, химическую стойкость) под действием внешних факторов (например, ультрафиолетового, рентгеновского или лазерного излучения, потока электронов, фокусированного ионного пучка).

Литографические процессы позволяют:

- получать на поверхности окисленных полупроводниковых подложек (или подложек с другими защитными слоями) свободные от слоя оксида области, задающие конфигурацию полупроводниковых приборов и элементов ИМС, в которые проводится локальная диффузия примесей для создания *p-n* переходов или получения областей с отличающимися уровнями удельного сопротивления, чем у исходной подложки;
- формировать межсоединения элементов ИМС;
- создавать технологические маски из резистов, обеспечивающие избирательное маскирование при ионном легировании.

Широкое применение литографии обусловлено ее следующими достоинствами:

1. Высокой воспроизводимостью результатов и гибкостью технологии, что позволяет легко переходить от одной топологии структур к другой, просто заменяя комплект шаблонов. Технологические режимы операций при этом, как правило, остаются неизменными.
2. Высокой разрешающей способностью резистов.
3. Универсальностью процессов, обеспечивающей их применение для самых разнообразных целей (травления, легирования, осаждения).
4. Высокой производительностью, обусловленной групповыми методами обработки.

Процесс литографии состоит из следующих операций:

1. Формирования необходимого рисунка элементов в слое чувствительного вещества (резиста), его экспонирования и проявления.
2. Травления нижележащего технологического слоя (диэлектрика, металла) через сформированную топологическую маску или непосредственного использования слоя резиста в качестве топологической маски при ионном легировании.
3. Удаления слоя резиста после переноса изображения на подложку.

В качестве диэлектрических слоев обычно используют пленки диоксида (SiO_2) и нитрида (Si_3N_4) кремния, а межсоединений – пленки металлов и поликристаллического кремния. При этом все нижележащие слои под маской называют *технологическими слоями*.

В зависимости от длины волны используемого излучения на стадии экспонирования различают следующие методы литографии:

1. Фотолитографию (длина волны излучения $\lambda = 150-440$ нм).
2. Рентгенолитографию (длина волны $\lambda = 0,5-2$ нм).
3. Электролитографию (поток электронов имеет энергию 10-100 кэВ или длину волны на уровне $\lambda = 0,05$ нм);
4. Ионолитографию (длина волны излучения ионов $\lambda = 0,05-0,1$ нм).

В зависимости от способа переноса изображения методы литографии могут быть контактными и проекционными. В свою очередь, проекционные методы могут быть без изменения масштаба переносимого изображения ($M 1:1$) и с уменьшением его масштаба ($M 10:1$; $M 5:1$).

В зависимости от типа используемого резиста (негативный или позитивный) методы литографии по характеру переноса изображения делятся на

негативные и позитивные.

Литография является прецизионным процессом, т.е. точность создаваемых рисунков элементов должна быть в пределах долей микрометра (0,3-0,5 мкм). Кроме того, различные методы литографии должны обеспечивать получение изображений необходимых размеров любой геометрической сложности, высокую воспроизводимость изображений в пределах полупроводниковых кристаллов и по рабочему полю подложек, а также низкий уровень дефектности слоя сформированных масок.

С другой стороны, литография – это сложный технологический процесс, основанный на использовании необратимых фотохимических явлений, происходящих в нанесенном на подложке слое резиста при его обработке актиничным излучением через маску (фотошаблон). **Актиничным излучением** называют излучение, характеристики которого (длина волны) обеспечивают надежное формирование рельефа в слое резиста.

Технологический процесс фотолитографии можно разделить на три стадии:

1. Формирование фоторезистивного слоя: обработка подложек с целью их очистки и повышения адгезионной способности, нанесение фоторезиста и его сушка.
2. Формирование защитного рельефа в слое фоторезиста: совмещение, экспонирование, проявление, задубливание слоя фоторезиста.
3. Создание рельефного изображения на подложке: травление технологического слоя (пленок SiO_2 , Si_3N_4 , металла), удаление слоя фоторезиста как выполнившего свою функцию в технологии изготовления ИМС и контроль качества сформированной структуры.

4.1. Позитивные и негативные фоторезисты

Фоторезисты – это светочувствительные материалы с изменяющейся под действием света растворимостью, устойчивые к воздействию травителей и применяемые для переноса изображения на подложку.

Фоторезисты являются многокомпонентными мономерно-полимерными материалами, в состав которых входят:

- светочувствительные вещества (поливинилциннаматы в негативные фоторезисты и нафтохинондиазиды в позитивные);
- пленкообразующие вещества (чаще всего – это различные фенолформальдегидные смолы, резольные и новолачные смолы);
- растворители (кетоны, ароматические углеводороды, спирты, диоксан, циклогексан, диметилформаид и др).

В процессе фотолитографии фоторезисты выполняют две функции: с

одной стороны, являясь светочувствительными материалами, они позволяют создавать рельеф рисунка элементов, а с другой, обладая резистивными свойствами, защищают технологический слой при травлении.

В основе создания рельефа в пленке негативных фоторезистов лежит использование фотохимической реакции – фотополимеризации, а в пленке позитивных фоторезистов – реакции фоторазложения (фотолиза). Для негативных фоторезистов освещенные при экспонировании участки не растворяются в проявителе и остаются на поверхности подложки. При этом рельеф представляет собой негативное изображение элементов фотошаблона. Для позитивных фоторезистов соответственно все наоборот (рис. 27).

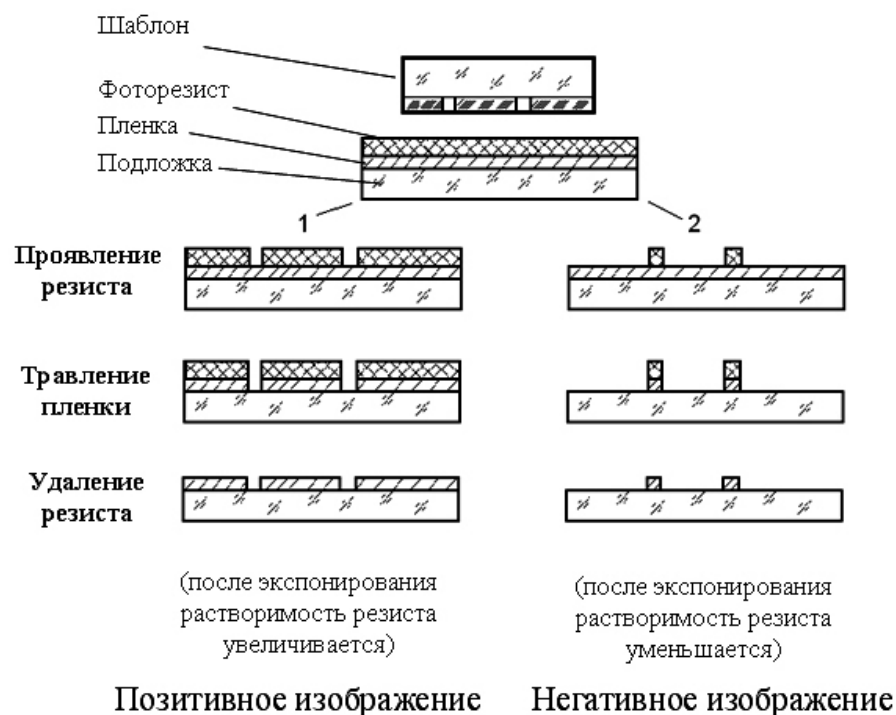


Рис. 27. Последовательность формирования позитивного (1) и негативного (2) изображений на подложке

4.2. Свойства фоторезистов

1. **Светочувствительность** (S) – величина, обратная экспозиции, требуемой для перевода фоторезиста в растворимое или нерастворимое (в зависимости от типа фоторезиста) состояние.

$$S = 1/H = 1 / (Et), \text{ где}$$

H – экспозиция, Вт·с/см²;

E – энергооблученность, Вт/см²;

t – длительность облучения, с.

2. Разрешающая способность – максимальное число линий одинаковой ширины, разделенных промежутками той же ширины, которое можно получить, используя данный фоторезист, на 1 мм (единице длины). Разрешающая способность фоторезиста определяет возможность создания при его использовании микрорельефа рисунка с минимальными размерами элементов. Разрешающая способность зависит от оптических явлений, происходящих в процессе экспонирования в системе фотошаблон-фоторезист-пластина, а также от процессов проявления и сушки. Для различных типов позитивных фоторезистов разрешающая способность лежит в пределах 400-500 лин/мм, а для негативных 50-400 лин/мм. Современные подходы преодоления эффекта близости (процессы нанолитографии) и новые типы резистов позволяют существенно повысить разрешающую способность. Следует различать разрешающую способность фоторезиста и разрешающую способность процесса фотолитографии, которая зависит от режимов травления. На практике необходимо ориентироваться на разрешающую способность фотолитографического процесса в целом. В планарной технологии разрешающая способность фотолитографии в целом – это предельное количество линий в одном миллиметре (в единице длины), вытравленных в слое диоксида кремния толщиной 0,5-1,0 мкм через промежутки равной ширины.

3. Кислотостойкость (кислотность) фоторезистов определяет возможность их обработки в сильных кислотных и щелочных смесях, т.е. способность после экспонирования, проявления и сушки (задубливания) селективно защищать поверхность заготовки от воздействия кислотных и щелочных травителей. Кислотостойкость измеряется в секундах. Значения кислотостойкости обычно лежат в пределах от 60 до 2400 с.

Примечание: формируемый рельеф в технологическом слое зависит не только от состава, но и от толщины и состояния самого маскируемого слоя. Поэтому часто принимается во внимание так называемый фактор травления $K = h/x$, где h – глубина травления, x – боковое подтравливание. Таким образом, чем меньше боковое подтравливание и меньше K при заданной глубине травления, тем выше кислотостойкость фоторезиста.

4. Адгезия – это способность слоя фоторезиста препятствовать проникновению травителя к подложке по периметру создаваемого рельефа рисунка элементов. Критерием адгезии является время отрыва слоя фоторезиста заданных размеров от подложки в ламинарном потоке проявителя. В большинстве случаев адгезию считают удовлетворительной, если слой фоторезиста 20x20 мкм отрывается за

время 20 мин. Об адгезии фоторезиста к подложке можно судить по углу смачивания, т.е. состоянию поверхности подложки.

5. **Технологичность.** Технологичность фоторезистов характеризуется их сроком службы при определенных условиях хранения и эксплуатации.

Примеры промышленных фоторезистов общего применения

В качестве **негативных фоторезистов** применяют составы на основе сложного эфира поливинилового спирта:



Эти составы называют поливинилциннаматами (ПВЦ) и их формула имеет вид: $\text{R}_1 - [\text{O} - \text{R}_2]_n$, где R_1 – макромолекула поливинилового спирта, R_2 – светочувствительная циннамоильная группа, представляющая собой продукты коричной кислоты.

При поглощении фотонов ультрафиолетового излучения в результате фотохимической реакции фотополимеризации происходит разрыв слабой двойной связи $-\text{CH}=\text{CH}-$ циннамоильной группы и образовавшиеся свободные связи сшивают молекулы полимера в химически стойкую трехмерную структуру.

Фоторезисты на основе ПВЦ представляют собой белый порошок, растворяющийся в органических растворителях (например, в смеси ацетата этиленгликоля с метаксилолом). Фоторезисты на основе ПВЦ имеют удовлетворительную кислотостойкость: они не выдерживают воздействия концентрированной плавиковой кислоты, но устойчивы к травителям с небольшим ее содержанием.

Повышенной кислотостойкостью обладают **негативные фоторезисты** на основе изопропилового каучука, циклокаучука и других каучуков с различными добавками. Так как сами каучуки не являются светочувствительными веществами, в состав фоторезистов вводят светочувствительные диазиды – сенсibilизаторы. Под действием света молекула диазосоединения разлагается с потерей молекулы азота, образуя стойкую трехмерную структуру.

В качестве **позитивных фоторезистов** используют смеси сульфозэфиров **нафтохинондиазидов** (НХД) с фенолформальдегидными смолами (новолачными или резольными) в органических растворителях. Светочувствительной основой такого фоторезиста является НХД, а смола играет роль кислотостойкого полимера. На рис. 28 показан пример наиболее

часто используемого полиэфира в составе позитивного фоторезиста – эфира на основе 1,2-нафтохинондиазида-5-сульфокислоты.

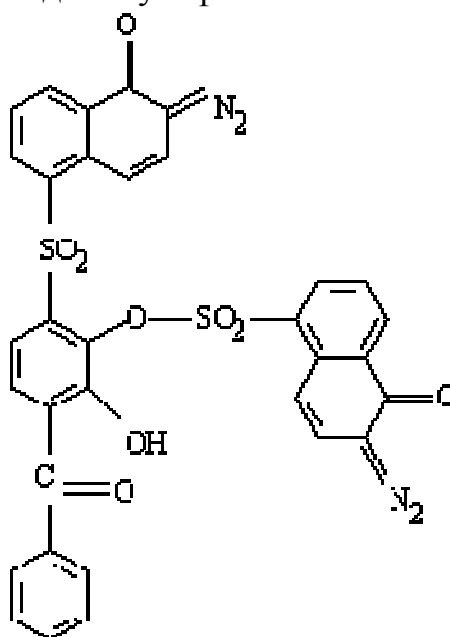


Рис. 28. Пример НХД, используемого в составе позитивного фоторезиста

Растворителями для фоторезистов обычно являются спирты, кетоны, ароматические углеводороды, диоксан, ксилол или их смеси.

Сухие пленочные фоторезисты (СПФ) впервые разработаны в 1968 г. фирмой Du Pont (США). Сухой пленочный фоторезист марки СПФ-2 выпускается с 1975 г. толщиной 20, 40 и 60 мкм и представляет собой полимер на основе полиметилметакрилата, расположенный между полиэтиленовой и лавсановой пленками толщиной 25 мкм каждая. В России выпускаются следующие типы сухих пленочных фоторезистов: проявляемые в органических веществах – СПФ-2, СПФ-АС-1, СРФ-П; водно-щелочные – СПФ-ВЩ2, ТФПК; повышенной надежности – СПФ-ПНЩ; защитные – СПФ3-ВЩ. Пленочный фоторезист – это многокомпонентная система, в состав которой входят: олигомерный ненасыщенный полиэфир, акриловый олигомер, сополимеры мономеров – стирола и акрилового олигомера, а также специальные добавки: фотосенсибилизатор, фотоинициатор и краситель.

Характеристики отечественных фоторезистов (ФР) для технологии микроэлектроники

Марка ФР	Тип ФР	Пик спектральной чувствительности, нм	Минимальная ширина линии R при толщине ФР d	
			d , мкм	R , мкм
ФП-383	Позитивный	407	1	4
ФП-307	Позитивный	407	1	2,5
ФП-333В	Позитивный	475	1	2,5
ФП-330	Позитивный	407	1	5,0
ПВЦ	Негативный	280-320	0,3	20

Сравнивая характеристики позитивных и негативных ФР, можно сделать общий вывод о том, что негативные фоторезисты, как правило, более чувствительны, но имеют худшую разрешающую способность.

4.3. Этапы операций фотолитографического цикла

Важно понимать, что фотолитография это не технологическая операция, а последовательность процессов, реализуемых в едином технологическом цикле. Фотолитография включает в себя следующие операции:

Нанесение слоя фоторезиста

Перед нанесением слоя фоторезиста производят очистку поверхности пластины. Нанесенный на предварительно подготовленную поверхность подложек слой фоторезиста должен быть однородным по толщине и по всему их полю, без проколов, царапин (т.е. быть сплошным) и иметь хорошую адгезию. Наносят слой фоторезиста на подложки в обеспыленной среде, соблюдая технологические режимы. Используемый фоторезист должен соответствовать паспортным данным, он не должен содержать посторонних инородных микрочастиц, которые могут привести к браку. Кроме того, необходимо проверить вязкость фоторезиста и при необходимости довести ее до нормы.

Для нанесения слоя фоторезиста на подложки используют следующие методы:

- а) центрифугирования;

- б) пульверизации;
- в) электростатический;
- г) окунания;
- д) полива;
- е) применяют также накатку пленки сухого фоторезиста.

Методом центрифугирования наносят слои фоторезиста, толщина которых может колебаться в пределах $\pm 10\%$. При вращении центрифуги с большой частотой происходит испарение растворителя, и вязкость фоторезиста быстро возрастает. Толщина нанесенного слоя h_{cl} зависит от вязкости ν фоторезиста и частоты вращения ω столика центрифуги, т.е.

$$h_{cl} = A\sqrt{\nu/\omega},$$

где A – коэффициент пропорциональности, зависящий от конкретной марки фоторезиста. Используя метод центрифугирования, можно в зависимости от вязкости фоторезиста и изменяя частоту вращения центрифуги от 1500 до 8000 об/мин регулировать толщину его слоя от 0,4 до 3,5 мкм. При малых скоростях центрифугирования слой фоторезиста получается неровным и наблюдается его утолщение по краям подложки.

Выбирая толщину слоя фоторезиста, необходимо учитывать, что он должен обладать высокой разрешающей способностью (чем меньше толщина, тем выше разрешающая способность) и не терять стойкости к травителю. Кроме того, слой фоторезиста не должен иметь дефектов в виде проколов, количество которых с уменьшением толщины увеличивается. Следовательно, толщина слоя фоторезиста должна быть наименьшей, но достаточной для обеспечения его стойкости к травителю и обеспечения малой дефектности итоговой защитной пленки. В методе центрифугирования подложки обрабатываются последовательно друг за другом, следовательно, для обеспечения высокой производительности на производстве используют несколько центрифуг, согласовывая их работу с другими установками. С целью обеспечения чистоты процесса подача пластин на технологический процесс осуществляется посредством шлюзования (рис. 29). Хранение и перенос пластин на большие расстояния осуществляется посредством специального контейнера, называемого «Smif Pod» (рис. 30).

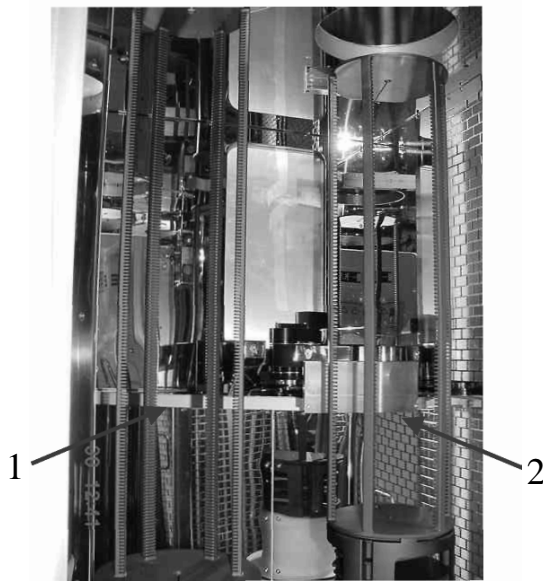


Рис. 29. Шлюзы для транспортировки и подачи пластин с диаметрами:
1 – 150 мм, 2 – 200 мм

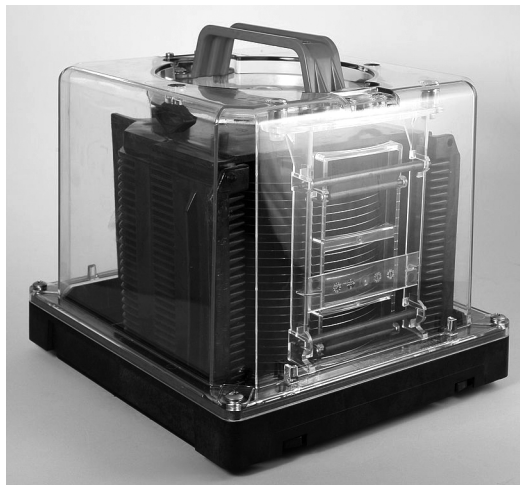


Рис. 30. Контейнер для полупроводниковых пластин (Smif Pod)

Метод пульверизации основан на нанесении слоя фоторезиста в виде аэрозоля с помощью форсунки, действующей под давлением сжатого воздуха или инертного газа. Подложки располагаются на расстоянии в несколько сантиметров от форсунки, и фоторезист, осаждаясь в виде капель, покрывает их сплошным слоем. Метод пульверизации позволяет в автоматическом режиме вести групповую обработку подложек. При этом толщина слоя фоторезиста составляет от 0,3 до 20 мкм с точностью не хуже 5%.

Достоинствами метода пульверизации являются:

- 1) возможность изменения толщины слоя фоторезиста в широких пределах;
- 2) однородность слоев по толщине;
- 3) отсутствие утолщений по краям подложек;
- 4) возможность нанесения фоторезиста на профилированные подложки (в углубления и отверстия);
- 5) сравнительно малый расход фоторезиста;
- 6) высокая производительность и автоматизация процесса;
- 7) хорошая адгезия слоя к подложкам (лучшая, чем при центрифугировании).

Недостатки этого метода состоят в том, что при его использовании необходимо специально подбирать растворители с тем, чтобы слой фоторезиста не стекал по подложкам. При этом следует тщательно очищать фоторезист и используемый для пульверизации газ, а также периодически прочищать форсунки.

При электростатическом методе слой фоторезиста наносят на подложки в электрическом поле напряженностью 1-5 кВ/см. Для создания такого поля между подложкой и специальным кольцевым электродом подают постоянное напряжение 20 кВ. При впрыскивании фоторезиста форсункой в пространство между электродом и подложкой капельки фоторезиста диаметром в несколько микрометров заряжаются и летят под действием электрического поля к пластине. Этот метод имеет высокую производительность и позволяет наносить слой фоторезиста на подложки большой площади. Недостаток метода – трудность стабилизации процесса, относительная сложность оборудования и возможность поражения оператора высоким напряжением. С целью предотвращения последнего на практике используют специальные защитные экраны.

Методы окунания и полива являются простейшими среди всех методов нанесения слоя фоторезиста. При реализации метода окунания подложки погружают на несколько секунд в ванну с фоторезистом, а затем вытягивают их с постоянной скоростью в вертикальном положении специальными подъемными устройствами и сушат, устанавливая их вертикально или наклонно. Полив фоторезиста на горизонтально расположенные подложки обеспечивает лучшую по сравнению с окунанием однородность слоя по толщине. Следует отметить, что при этом методе неизбежны утолщения слоя фоторезиста по краям. Окунание и полив применяют для нанесения слоя фоторезиста на подложки больших размеров, а также для получения толстых слоев фоторезиста (более 20 мкм) на обеих сторонах подложки.

Общим недостатком методов нанесения жидких (аэрозольных) фоторезистов является трудность получения сплошных слоев заданной толщины.

Накатка пленки сухого пленочного фоторезиста (СПФ) значительно упрощает процесс и обеспечивает получение равномерного покрытия на подложках большой площади. Пленочный фоторезист представляет собой трехслойную ленту, в которой слой фоторезиста заключен между двумя полимерными пленками: одна (более прочная) является несущей, а другая – защитной.

Перед нанесением защитную пленку удаляют, а фоторезист вместе с несущей пленкой накатывают валиком на подложки, нагретые до 100°C. Под действием температуры и давления фоторезист приклеивается к подложке. При этом его адгезия к подложке должна быть выше, чем к несущей пленке, которую затем удаляют.

Недостатки этого метода – невозможность получения тонких пленок фоторезиста и, как следствие, низкая разрешающая способность СПФ. Накатку пленки сухого пленочного фоторезиста используют только при больших размерах элементов ИМС и при изготовлении печатных плат.

Сушка фоторезиста

После нанесения фоторезиста для окончательного удаления растворителя из получаемого слоя его сушат. При этом уплотняется молекулярная структура слоя, уменьшаются внутренние напряжения и повышается адгезия к подложке. Неполное удаление растворителя из слоя фоторезиста снижает его кислотостойкость. Для удаления растворителя подложки нагревают до температуры, примерно равной 100°C. Время сушки выбирают в зависимости от марки и типа фоторезиста.

Существует три основных метода сушки фоторезиста:

- конвекционный;
- инфракрасный;
- посредством СВЧ-поля.

При **конвекционной сушке** подложки выдерживают в термокамере при 90-100°C в течение 15-30 мин. Недостаток этого метода – низкое качество получаемого фоторезистивного слоя и относительно длительное время сушки, высокий расход электроэнергии. Для увеличения производительности процесса используют системы конвейерного типа с автоматической загрузкой и выгрузкой пластин. Конвейер с пластинами с постоянной скоростью проходит через зону нагрева, обеспечивая сушку подложек. В данном способе источником нагрева подложек является нагретый очищенный аргон (азот), циркулирующий в объеме термокамеры (зоны обработки подложек). При повышенной температуре остатки растворителя в пленке фоторезиста испаряются и конвекционно удаляются из зоны нагрева посредством газа носителя. Основным достоинством данного процесса является высокая производительность и возможность групповой обработки подложек.

При инфракрасной сушке источником тепла является сама полупроводниковая подложка, поглощающая ИК-излучение от специальных ламп ИК-диапазона. Окружающая среда (очищенный и осушенный инертный газ или воздух) при этом сохраняет, благодаря непрерывной продувке, примерно комнатную температуру. При данном механизме сушки время сокращается до 5-10 мин. Качество слоя при использовании ИК-сушки слоя фоторезиста увеличивается за счет более равномерного прогрева подложек. При этом улучшается адгезия, уменьшается количество проколов в пленке фоторезиста.

При СВЧ-сушке подложки нагреваются, поглощая электромагнитную энергию СВЧ-поля. Такая сушка производится в печах мощностью 200-400 Вт при рабочей частоте 2,45 ГГц. Время сушки – несколько секунд. Достоинством этого метода является высокая производительность, а недостатками – сложность оборудования и необходимость тщательного экранирования рабочего объема во избежание облучения оператора, а также неравномерность сушки слоя фоторезиста на различных по электрическим характеристикам участках подложек. Поэтому сушке в СВЧ-печах подвергают только однородные подложки. Механизм сушки посредством СВЧ-поля заключается в том, что полярные молекулы растворителя в пленке фоторезиста в переменном электрическом поле начинают совершать интенсивные колебательные движения, приводящие к разогреву среды за счет трения. Выделяющееся за счет трения полярных молекул тепло интенсифицирует процесс сушки пленки фоторезиста.

ВАЖНО ЗАМЕТИТЬ: высушенный слой фоторезиста необходимо экспонировать не позднее чем через 10 ч.

Совмещение и экспонирование

Совмещение и экспонирование являются наиболее ответственными операциями процесса фотолитографии. Точность полученного в процессе фотолитографии топологического рисунка в первую очередь определяется прецизионностью процесса совмещения.

Передача изображения с фотошаблона на подложку должна выполняться с точностью до десятых долей минимального размера элемента, поэтому процессы совмещения и экспонирования проводят одновременно на одном рабочем месте на одной установке, не допуская даже малой вибрации фотошаблона и подложки.

Перед экспонированием слоя фоторезиста фотошаблон следует правильно сориентировать относительно подложки и рисунка предыдущего слоя. Для полного формирования структуры полупроводникового прибора или ИМС необходим комплект фотошаблонов со строго согласованными топологическими рисунками элементов.

При первой фотолитографии, когда поверхность подложек еще однородна, фотошаблон ориентируют относительно базового среза подложки. При последующих фотолитографиях, когда на подложках сформированы топологические слои, рисунок фотошаблона ориентируют относительно рисунка предыдущего слоя. Совмещают рисунки фотошаблона и подложки в два этапа. На первом этапе с помощью реперных модулей ("пустых кристаллов") выполняют грубое совмещение в пределах всего поля подложки. На втором этапе с помощью микроскопа в пределах единичного модуля по специальным знакам – фигурам совмещения, предусмотренным в рисунке каждого топологического слоя – выполняют точное совмещение. Форму фигур совмещения (кресты, круги, квадраты) выбирают в зависимости от типа, используемого при фотолитографии, фоторезиста. На рис. 31 показана часть кристалла микросхемы 132РУ6, содержащая фигуры совмещения.

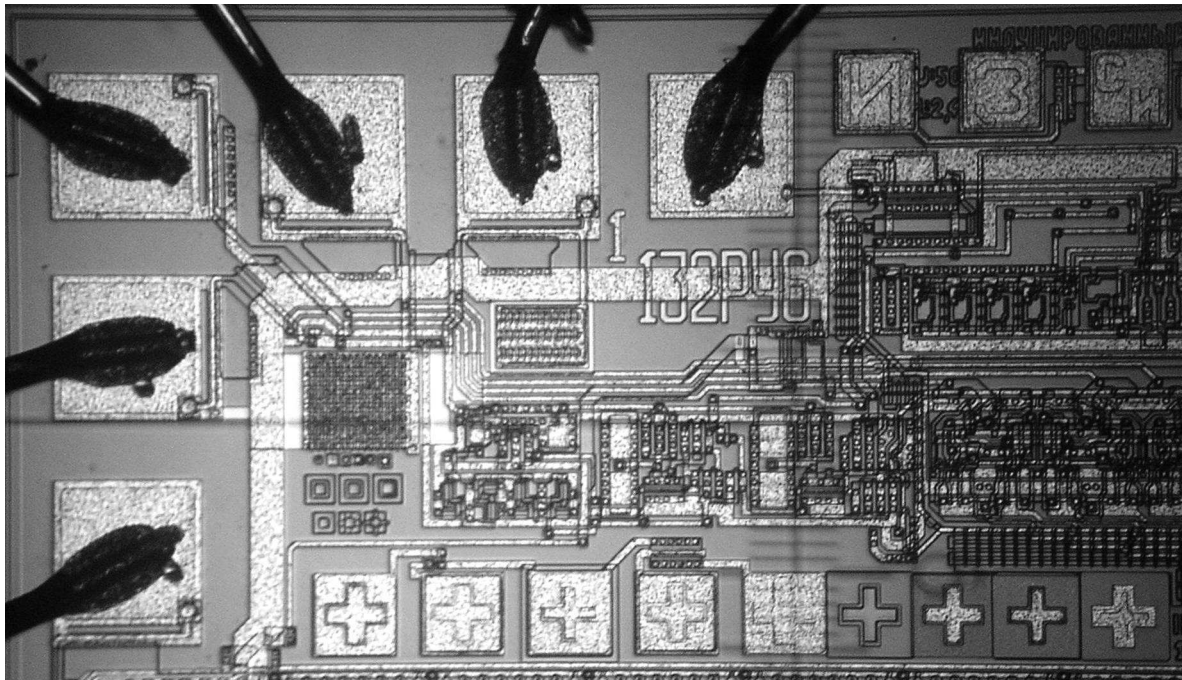


Рис. 31. Изображение части микросхемы 132РУ6, содержащей фигуры совмещения

Сложность операции совмещения состоит в том, что приходится с высокой точностью совмещать элементы малых размеров на большой площади. Для этого увеличение микроскопа должно быть не менее 200 раз.

Существуют два метода совмещения фотошаблонов с подложками: **визуальный**, при котором, выполняя совмещение, наблюдают за контрольными отметками в микроскоп (при этом точность совмещения составляет 0,25-1 мкм и зависит от возможностей установки) и **автоматизированный фотоэлектрический** с помощью фотоэлектронного микроскопа, обеспечивающий точность совмещения 0,1-0,3 мкм.

Современные установки совмещения и экспонирования представляют собой сложные оптико-механические комплексы. Точность совмещения и производительность зависят от выбранного метода совмещения – визуального или фотоэлектрического.

Важным оптическим эффектом при экспонировании является прохождение ультрафиолетового излучения через пленку фоторезиста. Световой поток, проходя через слой фоторезиста, частично рассеивается в нем, и, достигая подложки, отражается от нее и возвращается обратно в слой фоторезиста и проходит далее. Дойдя до поверхности фотошаблона, световой поток отражается под углом от его металлизированных непрозрачных участков и через прозрачные участки попадает в слой фоторезиста на подложке. Эти отражения светового потока приводят к нежелательному дополнительному экспонированию участков слоя фоторезиста, находящегося под непрозрачными участками фотошаблона. Интенсивность отраженного потока света зависит от коэффициентов отражения подложки и фотошаблона. Для снижения эффекта отражения при контактной фотолитографии используют цветные оксидные фотошаблоны, имеющие малый коэффициент отражения.

Важным фактором, ограничивающим разрешающую способность, является дифракция актиничного излучения при прохождении его через светлые участки (окна) в маскирующем слое фоторезиста.

Расхождение луча за счет дифракции (заход в теневую область) будет зависеть от расстояния между элементами на фотошаблоне d и длиной волны излучения λ (см. рис. 32), (засветка же теневой области еще будет зависеть и от длины хода луча после фотошаблона):

$$\lambda = \frac{d \sin(\alpha)}{n} \quad \text{или} \quad \sin(\alpha) = \frac{\lambda n}{d}, \quad (1)$$

где d – расстояние между штрихами на фотошаблоне, λ – длина волны излучения, n – порядок спектра (1, 2, 3 и т.д.).

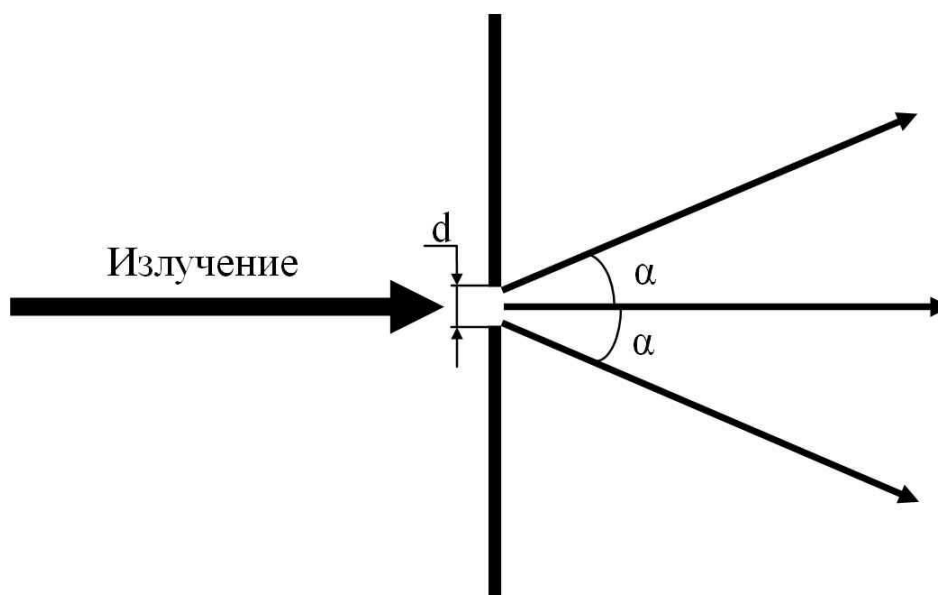


Рис. 32. Заход в теньевую область актиничного излучения при его прохождении через фотошаблон

Так, например, для 300 нм и элементов изображения на фотошаблоне в 1 мкм $\alpha = 17^\circ$, а для 0,01 нм и элементов изображения на фотошаблоне в 1 мкм $\alpha = 0,003^\circ$. Последнее демонстрирует эффективность использования источников облучения с меньшей длиной волны.

При зазоре между шаблоном и подложкой в условиях освещения параллельным пучком света минимальный формируемый размер можно определить так:

$$b_{\min} = 3/2 \sqrt{\lambda(z + h/2)},$$

где λ – длина волны актиничного излучения, z – величина зазора между фотошаблоном и подложкой, h – толщина слоя фоторезиста.

Стоит отметить, что зазор z между шаблоном и подложкой присутствует практически всегда, даже в случае контактной литографии, обусловленный их взаимной неплоскостью.

Обычные типы фоторезистов чувствительны в области длин волн примерно 0,4 мкм. Таким образом, при толщине его слоя около 1 мкм и зазоре $z = 0$ (жесткий контакт) минимальный размер переносимого элемента составляет $b_{\min} = 0,7$ мкм. Разрешающую способность можно увеличить, уменьшив толщину слоя фоторезиста. В реальных условиях зазор z значительно отличается от нуля, что приводит к уменьшению разрешающей способности. На дифракционное перераспределение интенсивности излучения существенно влияет также размер переносимого элемента.

В теории дифракции известны три случая дифракционного перераспределения актиничного излучения при прохождении его через отверстие в экране. Основным критерием здесь является волновой параметр:

$$P = \sqrt{\lambda z} / D,$$

где λ – длина волны актиничного излучения, z – расстояние до плоскости наблюдения (в нашем случае – зазор между фотошаблоном и подложкой), D – размер элемента на фотошаблоне.

В зависимости от значения параметра P на практике могут реализоваться различные случаи.

– **Случай Френеля** ($P \ll 1$) реализуется, когда размеры D топологических элементов достаточно велики и мал зазор z между фотошаблоном и подложкой (контактная фотолитография) или мала длина волны актиничного излучения (коротковолновое излучение – ультрафиолетовое, рентгеновское). При этом дифракционное перераспределение занимает малую пограничную область и искажения формы элемента минимальны.

– **Переходный случай** ($P \approx 1$) характеризуется тем, что дифракционная картина занимает всю область засветки и искажения формы элемента могут достигать максимальных значений.

– **Случай Фраунгофера** ($P \gg 1$) реализуется при малых размерах элементов или большом зазоре между фотошаблоном и подложкой. Максимальное искажение интенсивности засветки сопровождается тем, что ее максимум всегда лежит в центре. Можно подобрать такие условия экспонирования, при которых элементы переносятся с небольшими искажениями размеров при фиксированном зазоре (фотолитография с зазором). При этом зазор и расходимость пучка света от источника актиничного излучения должны быть строго фиксированными.

Интерференционные эффекты также влияют на разрешающую способность. Слой фоторезиста на подложке можно рассматривать как однородный оптический слой на отражающей поверхности. Известно, что такие слои в зависимости от толщины при освещении белым светом имеют характерную интерференционную окраску, обусловленную интерференционными эффектами. Актиничное излучение, используемое в проекционной фотолитографии, близко по спектральному составу к монохроматическому. При экспонировании фоторезиста пучком монохроматического света в его слое возникает стоячая волна, обусловленная взаимодействием (интерференцией) падающей волны и отраженной от границы раздела фоторезист-подложка. Взаимодействуя, падающая

и отраженная волны приводят к перераспределению интенсивности засветки в слое фоторезиста, что вызывает как бы последовательное усиление и ослабление экспонирования. Причем, как уже отмечалось, эта картина будет изменяться в зависимости от толщины и оптических характеристик слоя фоторезиста. Для получения воспроизводимых результатов при проекционной фотолитографии особенно важно, чтобы слой фоторезиста был высокооднородным по толщине.

Такие слои на практике контролируют по одинаковой окраске, рассматривая их под углом в белом свете. Допустима окраска по всей подложке в один цвет с тональным переходом (например, голубой – светло-голубой). При трех цветовых оттенках и более слои фоторезиста не отвечают необходимым требованиям.

Таким образом, учитывая, что при фотолитографии большую роль играют дифракционные и интерференционные явления, для увеличения разрешающей способности необходимо, чтобы толщина слоя фоторезиста и длина волны актиничного света были минимальны. Кроме того, при контактной фотолитографии следует использовать фотошаблоны с маскирующим слоем, обладающим малой отражающей способностью, а зазор между ними и подложками должен быть минимален. При проекционной фотолитографии следует обеспечивать высокую равномерность слоя фоторезиста.

Схема процесса, протекающего при облучении негативного фоторезиста на основе ПВЦ ультрафиолетовым излучением, показана на рис. 33.

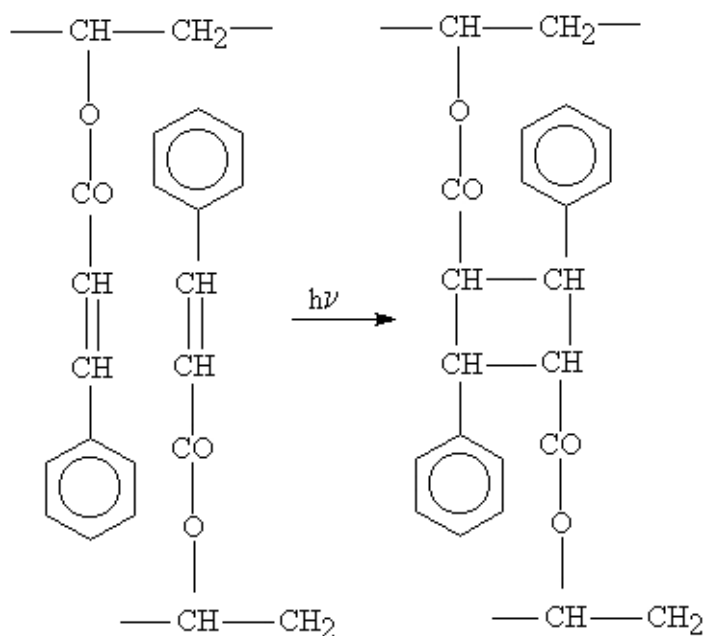


Рис. 33. Схема процесса экспонирования негативного фоторезиста на основе ПВЦ

На рис. 34 приведена схема процесса экспонирования негативного фоторезиста на основе диазосоединения.

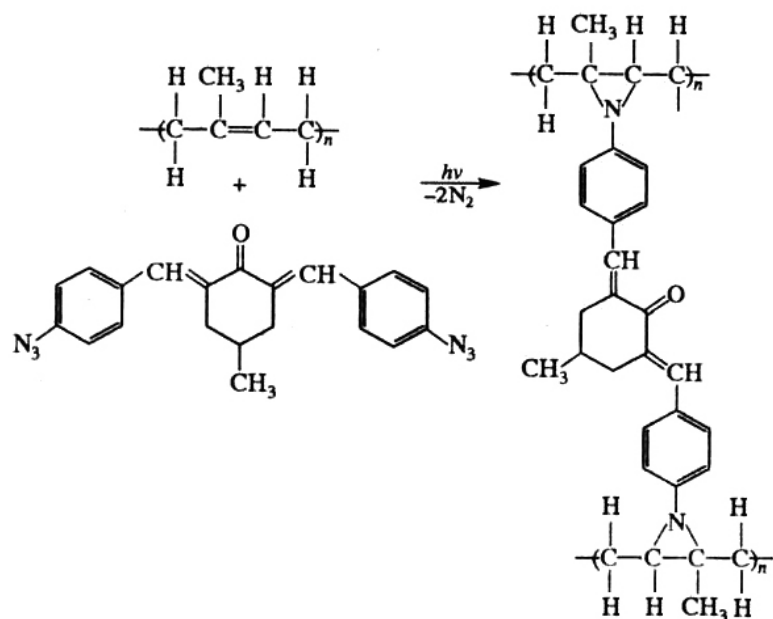


Рис. 34. Схема процесса экспонирования негативного фоторезиста на основе каучука и диазида

При экспонировании позитивного фоторезиста на основе нафтохинондиазида в результате фотохимических реакций фотолиза гидрофобные производные НХД разрушаются и становятся гидрофильными, приобретая способность растворяться в слабых водных растворах щелочей, которые и являются проявителем для позитивных фоторезистов. На рис. 35 показан механизм экспонирования (I) и модификации (II, III) позитивного фоторезиста на основе НХД.

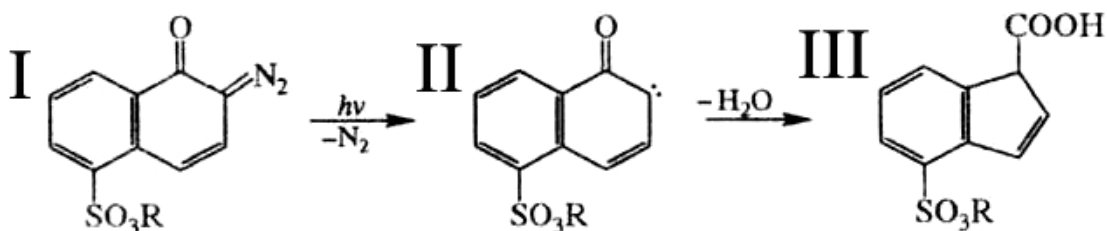


Рис. 35. Механизм экспонирования позитивного фоторезиста на основе нафтохинондиазида

Как видно из этой схемы при экспонировании светочувствительный компонент (I) расщепляется, в результате чего образуется инденкентен (II), который интенсивно поглощает воду, и образуется инденкарбоновая кислота (III). Наличием группы COOH в инденкарбоновой кислоте определяется выбор растворов, пригодных для проявления (щелочи, аммиак и др.), с которыми эта кислота образует легко растворимые в воде соли, вымываемые при проявлении.

Проявление слоя фоторезиста

Проявление заключается в удалении (в зависимости от использованного типа фоторезиста) экспонированных или неэкспонированных участков, в результате чего на поверхности подложек остается защитный рельеф – фоторезистивная маска требуемой конфигурации.

Проявителями для ***негативных фоторезистов*** служат органические растворители: уайт-спирит, трихлорэтилен, хлорбензол, изопропиловый спирт и их смеси. Время проявления 0,5-1 мин.

Для проявления ***позитивных фоторезистов*** используют слабые водные и водно-глицериновые растворы щелочей: 0,3-0,6% раствор КОН или 1-2% раствор тринатрийфосфата. Время проявления порядка 30-40 с.

При проявлении негативных фоторезистов основными факторами являются полнота реакции полимеризации фоторезиста при экспонировании и тип проявителя, а позитивных – концентрация проявителя и время проявления.

Кроме того, важным фактором при проявлении позитивных фоторезистов является значение рН и температура проявителя. При изменении рН всего на десятую долю процента размер элемента рельефного рисунка может измениться на 10%. С ростом температуры скорость проявления (скорость растворения фоторезиста в проявителе) растет, и размеры проявленных участков увеличиваются.

Механизм проявления негативных фоторезистов основан на следующих процессах:

- диффузии молекул проявителя к экспонированным и неэкспонированным участкам слоя фоторезиста;
- набухании неэкспонированных участков и частично экспонированных участков слоя фоторезиста;
- растворении неэкспонированных участков и переходе молекул мономера в объем проявителя;
- формировании рельефа элементов рисунка;
- удалении остатков фоторезиста с неэкспонированных участков;
- испарении проявителя из объема экспонированных участков фоторезиста и восстановлении первоначальных геометрических размеров элементов рисунка.

Механизм проявления позитивных фоторезистов заключается в образовании при химической реакции растворимых соединений, которые вымываются при проявлении. Структурная схема такой реакции приведена на рис. 36.

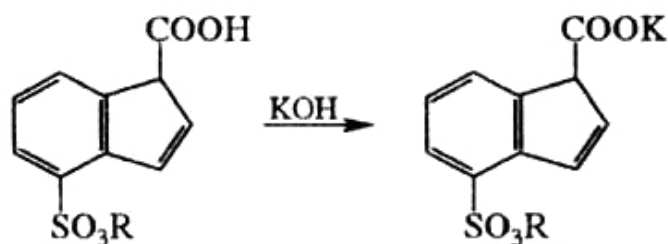


Рис. 36. Механизм проявления позитивного ФР на основе НХД

Проявитель для негативных фоторезистов должен обладать, с одной стороны, хорошей растворяющей способностью по отношению к исходному мономерному материалу фоторезиста, а с другой стороны, минимальным воздействием на экспонированные участки слоя. Кроме того, проявитель должен вызывать минимальное набухание экспонированных участков и, следовательно, наименьшие искажения геометрических размеров элементов рисунков. Набухание экспонированных участков в основном зависит от количества поперечных связей и свойств молекул шитого полимера. При недостаточной экспозиции облученные участки будут либо полностью растворяться, либо набухать до такой степени, что слой фоторезиста может оторваться от поверхности подложки или настолько увеличиться в объеме, что соседние элементы рисунка соединятся между собой.

Негативные фоторезисты проявляют пульверизацией (дисперсионное проявление) или поливом. Эти методы обеспечивают удовлетворительную чистоту процесса, хорошее удаление продуктов реакции и высокую производительность, а также возможность объединения в едином цикле на одной установке операций проявления, промывки и сушки на центрифуге. Позитивные фоторезисты проявляют в ваннных системах.

Сушка проявленного рельефа (задубливание)

Задубливание проявленных участков слоя фоторезиста обеспечивает:

1. Окончательное удаление из полимерной пленки фоторезиста остатков проявителя и (или) растворителя.
2. Окончательное завершение всех полимеризационных (деструкционных) процессов в объеме полимерной пленки и упрочнение химических связей в слое фоторезиста.
3. Затяжку незначительных проколов и дефектов в структуре полимерной пленки.
4. Возвращение разбухших участков фоторезиста после проведения жидкостной операции проявления на свои нормативные размеры.

Вследствие выше перечисленного повышается стойкость слоя фоторезиста к действию травителей и улучшается его адгезия к подложке. Задубливание слоя фоторезиста является второй сушкой и отличается от первой, выполняемой после его нанесения, более высокой температурой. При повышенных температурах происходит пластическая деформация слоя фоторезиста и затягиваются мелкие отверстия, поры и дефекты.

Температура задубливания негативных фоторезистов на основе поливинилциннамата составляет 200-220°C при времени выдержки до 1 ч. При более высоких температурах даже кратковременная сушка вызывает термическое разрушение слоя фоторезиста: он приобретает коричневую окраску, поверхность покрывается мелкими трещинами и рельеф полностью теряет свои защитные свойства.

С ростом температуры сушки позитивных фоторезистов на основе нафтохинондиазида и каучуков улучшается их адгезия к подложке и увеличивается пластическая деформация. Например, сушка при 240°C в течение 30 мин значительно улучшает стойкость фоторезистивной маски к травлению, особенно при фотолитографии на фосфорно-силикатном стекле, к которому фоторезисты обычно имеют плохую адгезию.

Общей тенденцией здесь является то, что для негативных фоторезистов необходимо четко выдерживать температуру в процессе задубливания, интервал которой достаточно мал. Для позитивных фоторезистов диапазон температур задубливания более широкий и критические температуры не вызывают деструкции полимерной пленки.

Травление технологических слоев через маску фоторезиста

Важным этапом процесса фотолитографии является формирование топологии рельефного рисунка на подложках в технологическом слое (маскирующей, изолирующей, защитной диэлектрической или проводящей металлической пленке) травлением с последующим удалением слоя фоторезиста и очисткой подложек. Эти операции осуществляют химическим жидкостным, реже плазменным «сухим» травлением. Химические процессы травления технологических слоев подробно рассмотрены в разделе № 1 данного пособия. Отметим лишь то, что травление в жидких средах всегда изотропно, то есть идет в различных направлениях с одинаковой скоростью, что вызывает неизбежный подтрав под маску фоторезиста. Количественной характеристикой качества процесса жидкостного травления является клин травления, определяемый через угол, образованный между профилем протравленной структуры и нормалью к ее поверхности. Чем меньше клин, тем качество процесса травления лучше. На практике стремятся минимизировать эту характеристику. Однако именно режимы химического травления во многом определяют профили получаемых элементов и клин травления. На рис. 37 представлены наиболее распространенные профили для жидкостного

травления.

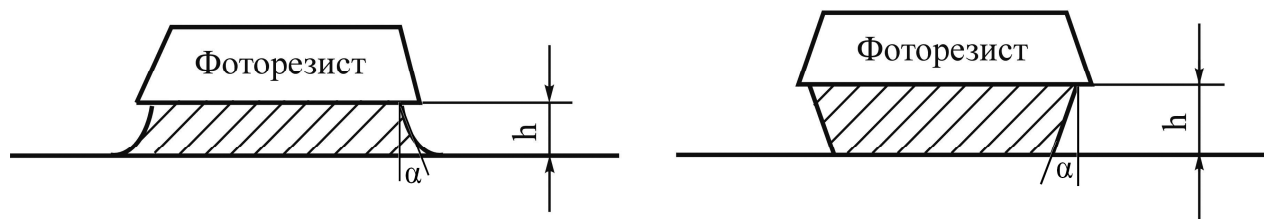


Рис. 37. Возможные профили элементов (показаны штриховкой) после жидкостного травления при условии: а – если смачивание подложки травителем меньше, чем травимого слоя; б – при обратном соотношении; h – толщина травимого технологического слоя; α – клин травления

В общем, конфигурация профиля определяется скоростью травления, адгезией защитной фоторезистивной маски, методом травления, толщиной протравливаемой пленки и смачиваемостью травителем поверхности травимого слоя и подложки (соотношением их краевых углов смачивания травителем) (см. рис. 37).

Удаление слоя фоторезиста

После создания топологии будущей микросхемы (осуществления травления через маску фоторезиста) слой фоторезиста удаляют, как выполнившего свою технологическую задачу. Для удаления фоторезистивной маски подложки обрабатывают в горячих органических растворителях (диметилформамиде, метилэтилкетоне, моноэтанолаmine и др.). При этом слой фоторезиста разбухает и вымывается. Скорость и чистота удаления фоторезиста зависят от степени его задубливания при второй термообработке.

При высоких температурах задубливания ($140-150^{\circ}\text{C}$) в слое фоторезиста происходят термореактивные превращения, в результате которых он теряет способность растворяться в органических растворителях. В этом случае подложки два-три раза кипятят по 5-10 мин в концентрированной серной кислоте или смеси Каро (серная кислота и перекись водорода). Слой фоторезиста при этом разлагается и растворяется в кислоте, а затем его окончательно удаляют в органическом растворителе. Напомним, что концентрированная серная кислота не обладает окислительными свойствами, она лишь способна «обугливать» органику.

Некоторые фоторезисты хорошо удаляются в водных растворах поверхностно-активных веществ, например, кипячением 5-10 мин в 30%-м растворе синтанола.

Интенсивность удаления слоя фоторезиста можно увеличить ультразвуковым воздействием. Для этого ванночку с подложками, заполненную реагентом, помещают в ультразвуковую ванну. Время обработки при этом

уменьшается в 10-20 раз.

Для удаления позитивных фоторезистов, температура сушки которых не превышала 95°C, подложки предварительно облучают ультрафиолетом. При этом НХД превращаются в инденкарбоновые кислоты, которые легко удаляются в полярных органических растворителях.

Удаление фоторезиста можно проводить и плазмохимическим методом на установках ПХТ (плазмохимического травления) в плазме кислорода или воздуха. В настоящее время перспективным методом удаления фоторезиста является обработка подложек в деионизованной воде с добавками озона в универсальных кислотных процессорах. Нагретая деионизованная вода с озоном проявляет такие же окислительные свойства, как и разбавленная горячая серная кислота.

После химического удаления слоя фоторезиста подложки тщательно очищают от его остатков, которые могут отрицательно сказаться на таких последующих технологических операциях, как диффузия, окисление, нанесение металлизации и др. Кроме того, необходимо качественно очищать поверхность подложек от загрязнений, вносимых при обработке в активных средах.

Химическую обработку проводят на установках, входящих в комплекс универсального оборудования, предназначенного для очистки подложек. Все эти операции проводят во фторопластовых ваннах, снабженных нагревателями и эжекторами для откачки реагентов после окончания технологического процесса.

4.4. Способы увеличения разрешающей способности фотолитографических процессов

Важнейшим преимуществом технологий фотолитографического формирования изображений является возможность одновременного и параллельного переноса изображения, состоящего из многих миллионов элементарных фрагментов, благодаря волновому характеру оптических процессов. Именно это считают основой высокой технической и экономической эффективности фотолитографии и возможности достижения высоких уровней интеграции современных микросхем. Как уже было сказано ранее, наиболее успешным методом создания микрорисунка в микросхемах оказался проекционный перенос изображения с уменьшением масштаба. Разрешающая способность в нем регламентируется дифракционным пределом оптической системы. Утверждается, что минимальный размер изображения прямо пропорционален произведению $k_0\lambda$ и обратно пропорционален числовой апертуре NA , где λ – длина волны актиничного излучения, k_0 – числовой коэффициент, равный для некогерентного света 0,61. Реально этот коэффициент оказывается переменной величиной, существенно зависящей не только от степени когерентности, но и от метода регистрации изображения (его в отличие от k_0 обозначают k_l и называют технологическим коэффициентом). При успешном применении

некоторых технологических приемов он может быть уменьшен до $k_l \sim 0,2$.

Числовая апертура – это одна из характеристик проекционного объектива, определяемая как:

$$NA = n \sin(\alpha),$$

здесь n – коэффициент преломления среды в пространстве изображения (для воздуха $n \sim 1$); α – половина максимального угла расходимости лучей, приходящих в точку изображения на оптической оси проекционной системы.

Существует еще один параметр проекционной системы – ее глубина резкости (на практике обычно нужна максимальная глубина резкости). Она определяется выражением:

$$\delta = \frac{\lambda}{2[NA]^2}.$$

Таким образом, чем больше числовая апертура, а это необходимо для увеличения разрешающей способности проекционной системы, тем меньше ее глубина резкости. Первоначально минимально переносимый (критический) размер (CD – Critical Dimension) изображения уменьшали за счет уменьшения длины волны актиничного излучения (см. табл. 12).

Таблица 12

Используемые в микроэлектронике источники света и соответствующие им длины волн

Источник света	Спектральная линия	Длина волны	Расположение в спектре электромагнитной радиации
Ртутная дуговая лампа	g-line	436 нм	Видимый
	h-line	405 нм	Видимый
	i-line	365 нм	Ближний УФ
	Глубокий УФ	240-255 нм	Глубокий УФ
Эксимерный лазер	KrF	248 нм	Глубокий УФ
	ArF	193 нм	Глубокий УФ
	F ₂	157 нм	Вакуумный УФ

Итак, на современном фотолитографическом объективе с числовой апертурой ($NA = 0,95$) и при применении эксимерного лазера ArF (193 нм) мы получим длину Релея на воздухе 124 нм. Это хороший результат, однако,

дальнейшее уменьшение оптически формируемых изображений без дополнительных мер оказывается невозможным.

Реальным решением данной проблемы является использование альтернативных источников облучения при литографии, в частности, использование рентгеновской, ионной или электронно-лучевой литографии.

4.5. Рентгенолитография

Основу рентгеновской литографии (РЛ) составляют принципы контактной или бесконтактной печати при использовании для экспонирования рентгеновского излучения. В этом случае можно пренебречь явлением дифракции, свойственным фотолитографии, а также явлением обратного рассеяния, возникающим при электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ). Рабочий шаблон помещают в установку экспонирования, где происходит перенос топологии шаблона на подложку. Подложка предварительно грубо совмещается с шаблоном, после чего включается рентгеновская установка. Предварительное совмещение выполняют по специальным меткам на рентгеношаблоне и подложках при освещении монохроматическим излучением видимого диапазона. Точное совмещение выполняется непосредственно перед экспонированием рентгеновским излучением. При совмещении, излучение, проходя через метки совмещения, попадает в детектор, сигнал с которого поступает на пьезоэлектрические приводы, приводящие в движение столик с подложками по осям X и Y . Перемещение столика продолжается до тех пор, пока середины реперных меток на шаблоне и подложке не совпадут. В этом случае непрозрачные для рентгеновских лучей области полностью поглотят лучи, и детекторы нуля дадут сигнал об окончании совмещения. Для совмещения используют также источники ИК-излучения, имеющие большую, чем у рентгеновских лучей, глубину проникновения в кремний.

Итак, при рентгенолитографии изображение на полупроводниковую подложку переносится с шаблона, называемого рентгеношаблоном, с помощью мягкого рентгеновского излучения, длина волны которого 0,5-2 нм. Разрешающая способность рентгенолитографии 0,2-0,3 мкм. В современном производстве рентгенолитография частично находит свое применение, хотя наличие рентгеновского излучения зачастую диктует поиск альтернативных вариантов проведения литографии.

Для реализации рентгенолитографии необходимы:

- мощный источник рентгеновского излучения с малой расходимостью пучка;
- рентгеношаблоны, обладающие высокой прочностью, контрастностью и малым температурным коэффициентом линейного расширения;
- рентгенорезисты высокой разрешающей способности и чувствительности;
- системы мультимпликации изображения, погрешность совмещения которых не превышает 0,03-0,05 мкм.

Для получения рентгеновского излучения используют специальные мишени из Cu, Al, Mo, Pd, облучаемые электронными пучками. Основной характеристикой источника рентгеновского излучения является длина волны и способность материала мишени выдерживать электронный поток высокой интенсивности. Мишень при облучении мощными потоками электронов сильно нагревается, плавится и испаряется, поэтому отвод теплоты является основной задачей при создании высокоинтенсивных источников излучения. Так как электроны и рентгеновские лучи достаточно легко рассеиваются в воздухе, то рентгеновский источник помещают в высокий вакуум. По этой же причине системы совмещения и экспонирования также располагают в вакуумной рабочей камере. Высоковакуумная часть установки рентгенолитографии отделяется от низковакуумной вакуумно-плотным окном, прозрачным для мягкого рентгеновского излучения. Этим требованиям отвечают окна из бериллия или прочных органических пленок толщиной до 7-8 мкм, которые, кроме того, обладают незначительным поглощением рентгеновского излучения и обеспечивают надежную изоляцию объемов источника и рабочей камеры.

Наиболее перспективным источником рентгеновского излучения является синхротронное излучение, создаваемое ускорителем электронов в магнитном поле при движении их по криволинейным траекториям. Синхротронное излучение имеет непрерывный спектр, максимум которого при достаточно большой энергии (до 1 ГэВ) приходится на область мягкого рентгеновского излучения. Использование синхротронного излучения в рентгенолитографии обусловлено его сильной природной коллимацией, то есть малой расходимостью потока.

Синхротронное излучение обладает высокой интенсивностью и превосходит в тысячи раз рентгеновское излучение, создаваемое мишенями. Благодаря этому экспонирование синхротронным излучением составляет единицы секунд, что обеспечивает высокую производительность рентгенолитографии. Однако, стоимость синхротронов очень велика, поэтому рекомендуется его использование одновременно на большое количество каналов экспонирования.

Рентгенорезисты не являются особым классом органических соединений и не отличаются по механизму работы, например, от электронорезистов. Особенность состоит лишь в том, что поглощение слоем резиста рентгеновского излучения меньше, чем электронного пучка, поэтому и эффективность экспонирования рентгеновскими лучами ниже. В результате поглощения кванта энергии рентгеновского излучения в резисте возникают фотоэлектроны, которые, взаимодействуя с полимерной основой позитивных или негативных резистов, приводят к ее деструкции или объемной полимеризации. Кроме того, следует учитывать, что в результате поглощения рентгеновского излучения подложка также излучает электроны, которые производят дополнительное экспонирование. Именно вторичное электронное излучение ограничивает разрешающую

способность рентгенолитографии. Примеры резистов, используемых в рентгенолитографии, приведены в табл. 13.

Таблица 13

Примеры промышленных рентгенорезистов

Рентгенорезист	Тип	Доза облучения, мДж/см ²
Полиметилметакрилат	Позитивный	1000
Полибутенсульфон	Позитивный	100
Сополимер глицидилметакрилата и этилакрилата	Негативный	50
Поли-(2,3-дихлор-1-пропилакрилат)	Негативный	10
Эпоксидированный полибутадиен	Негативный	5,2
Поли-2-хлорэтилвинил эфир (1%-й винилоксиэтилакрилат)	Негативный	18
Сополимер метилметакрилата и метакрилата Т1 (массовая доля 28%)	Позитивный	28
Смесь диакрилата бария (массовая доля 4 части) и диакрилата свинца (массовая доля 1 часть)	Позитивный	25
Сополимер глицидилакрилата и 2,3-дибром-1-пропилакрилата (молярная доля 60%)	Позитивный	15
Поли-(2,2,3,4,4,4-гексафторбутилметакрилат)	Позитивный	52

Важной проблемой рентгенолитографии является разработка технологии изготовления рентгеношаблонов, которые должны отвечать определенным требованиям. Маска рентгеношаблона, нанесенная на тонкую мембрану, должна хорошо поглощать рентгеновское излучение, а мембрана должна обладать малым коэффициентом поглощения, достаточной механической прочностью и не давать усадок и искажений при изменении внешних условий.

Исходя из этих требований, маски формируют в виде тонких пленок Au,

Pt, W, Mo, а мембраны изготавливают в виде тонких слоев Be, Si, SiO₂, Si₃N₄, Al₂O₃, их сочетаний или специальных безуглеродных полимерных пленок.

Одним из достоинств рентгенолитографии является возможность получения структур субмикронных размеров с низким уровнем дефектности. Это объясняется тем, что загрязняющие частицы, как правило, органические, существенно не ослабляют рентгеновское излучение при экспонировании, вследствие чего дефекты рентгеношаблона не переносятся на слой резиста на подложке.

4.5.1. Маски для рентгенолитографии

Основная цель при создании масок для РЛ заключается в изготовлении тонкой подложки, прозрачной для рентгеновского излучения. С одной стороны, маска должна хорошо пропускать рентгеновское излучение в местах, где отсутствует поглощающий слой, с другой – хорошо поглощать его в непрозрачных местах. Для изготовления подложек используют два типа мембран – органические и неорганические (полиамид, кремний, двуокись кремния, алюминий и их соединения).

Подложки должны обеспечивать стабильность размеров масок при изменении температуры и воздействии влаги. При совмещении маски с подложкой с точностью 0,1 мкм стабильность размера маски должна быть лучше 0,1 мкм на расстоянии свыше 100 мм. Маска для РЛ не может быть изготовлена на стеклянной основе, так как в этом случае она поглощала бы большую часть рентгеновского излучения. Обычно применяются материалы с малой удельной массой, такие как бериллий, алюминий, кремний и другие простые вещества и соединения легких элементов, например SiO₂, Si₃N₄, SiC, а также некоторые органические соединения.

Для уменьшения влияния эмиссии оже- и фотоэлектронов из резиста между экспонируемой пластиной и резистом вводят тонкий буферный слой металла или покрывают резист тонким слоем (5...80 нм) металла, например эрбия, который обладает большим коэффициентом поглощения рентгеновских лучей. При этом рентгеновское излучение поглощается в металле, и вторичные электроны, имеющие значительно большее сечение взаимодействия с резистом, экспонируют его.

Оптимальная толщина подложки для рентгеновской маски и толщина абсорбирующего материала являются функциями длины волны рентгеновского излучения и параметров применяемого резиста. Поглощающий рентгеновское излучение материал можно сформировать разными методами. Обычно наносят два металлических слоя: нижний – слой хрома, обеспечивающий адгезию к подложке, и верхний – слой золота, толщина которого зависит от степени жесткости рентгеновского излучения и составляет обычно 0,5...0,7 мкм. Рисунок на слое золота формируется с помощью одного из четырех процессов:

ионно-лучевого травления, электрохимического осаждения, распыления или взрывной ФЛ.

Маски, изготовленные для РЛ, могут использоваться и для ионолитографии, основанной на облучении пленки резиста коллимированным ионным лучом.

4.6. Ионно-лучевая литография

Ионно-лучевая литография (ИЛЛ) – метод получения структур с субмикронными размерами элементов. Разрешающая способность ИЛЛ выше, чем электронной. Дифракционные ограничения практически отсутствуют, так как длина волны де Бройля для ионов при сравнимых энергиях значительно меньше, чем для электронов и тем более фотонов. Для ИЛЛ не существует эффекта близости. Боковое рассеяние ионов при их проникновении в вещество незначительно, вторичные электроны имеют малую энергию и тормозятся на расстояниях, меньших сотой доли микрометра. Резисты обладают значительно более высокой чувствительностью к ионам, чем к электронам, так как удельные потери энергии ионов в десятки раз больше. Разрешающая способность ионолитографии 0,1-0,2 мкм.

Ионолитография обладает рядом достоинств, которые обусловлены особенностями взаимодействия ионов с материалом резиста.

Первое достоинство состоит в том, что ионы, обладая значительно большей массой, чем электроны, активно взаимодействуют с материалом резиста, следовательно, больше тормозятся и имеют малый пробег, а значит и меньше, чем электроны, рассеиваются. Таким образом, эффект близости при ионолитографии проявляется незначительно, что обуславливает ее высокую разрешающую способность.

Второе достоинство связано с сильным поглощением ионов, поэтому перенос изображения можно проводить при меньших, чем при электронолитографии, дозах.

Кроме того, пучком ионов можно непосредственно локально легировать структуру ИМС, т.е. формировать им соответствующие структурные области (базы, эмиттеры, каналы полевых транзисторов и др.). При этом пользуются узким прямоугольным пучком переменной формы, которым непосредственно сканируют соответствующие области структуры. Возможен также вариант обработки поверхности полупроводника широким пучком ионов через трафаретный шаблон.

Таким образом, при формировании структур ИМС узким пучком ионов процесс литографии в обычном понимании заменяется процессом размерного легирования, называемым также *имплантографией*.

Основными элементами установок ионолитографии являются:

– источники ионов;

- система фокусировки;
- система развертки ионных пучков.

Источник ионов должен обеспечивать формирование ионного пучка необходимой энергии, формы и высокой плотности тока. Энергией ионов, как и при ионном легировании, определяется глубина их проникновения в подложки.

4.7. Электронолитография

Электронолитография (ЭЛ) основана на непосредственном создании или проекционном переносе изображения на подложку с помощью пучка электронов. Этот метод наиболее перспективен для формирования элементов изображения, размеры которых составляют менее микрометра, и имеет несколько существенных отличий от фотолитографии.

1. Электронный пучок, ускоренный электрическим полем при разности потенциалов U , В, характеризуется длиной волны, нм, актиничного излучения:

$$\lambda = 0,1\sqrt{150/U}$$

Так, при разности потенциалов 15000 В длина волны составит 0,01 нм, что более чем в десять тысяч раз меньше длины волны актиничного излучения, используемого в фотолитографии. Следовательно, даже при формировании элементов размером менее 1 мкм дифракционные явления не будут оказывать существенного влияния.

Действительно, согласно (1) расхождение луча за счет дифракции (заход в теньную область) $\alpha = 0,003^\circ$ (для $\lambda = 0,01$ нм и элементов изображения на фотошаблоне в 1 мкм) по сравнению с $\alpha = 17^\circ$ (для фотолитографии с длиной волны актиничного излучения 300 нм).

2. Энергия кванта света $E = hc/\lambda$, а при прохождении ускоряющей разности потенциалов U энергия электрона соответственно равна $E_e = eU$, где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона.

Таким образом, при $\lambda = 300$ нм энергия кванта света $E = 6,6 \cdot 10^{-19}$ Дж, а при $U = 15000$ В энергия электрона $E_e = 2,4 \cdot 10^{-15}$ Дж.

Столь высокая энергия электронного пучка по сравнению с энергией кванта света позволяет применять в ЭЛ специальные чувствительные полимерные составы, называемые электронорезистами.

4.7.1. Свойства электронорезистов

- 1. Чувствительность электронорезиста.** За чувствительность позитивного резиста принимается доза, при которой облученные участки проявляются на полную глубину слоя, а на неэкспонированных участках сохраняется более 90% исходной толщины пленки. Чувствительность негативного резиста обычно определяется дозой, при которой на экспонированных участках остается около половины исходной толщины пленки.
- 2. Контраст.** Зависимость приведенной остаточной толщины резиста от приведенной дозы экспонирования. Приведенная толщина – это остаточная толщина резиста после проявления к начальной толщине. Приведенная доза – отношение дозы экспонирования к чувствительности.
- 3. Разрешающая способность.** Разрешающая способность резиста может измеряться двумя способами: по числу пар линий проявленного изображения на единицу длины (линия/мм) и по наименьшей ширине отдельной изолированной линии (мкм). Определение разрешающей способности по первому способу приводит к искажению истинной разрешающей способности резиста из-за эффекта близости соседних линий. Это связано с причинами, по большей части не зависящими от резиста (энергия электронов, материал подложки и т.д.). Второй метод в большей степени отражает свойства резиста, хотя и в этом случае существуют эффекты, искажающие этот параметр, так как между диаметром пучка экспонирующих электронов и шириной воспроизводимой в резисте линии существует определенная взаимосвязь.
- 4. Плазмостойкость электронорезистов.** Она оценивается по соотношению скоростей плазменного травления резиста и подложки в заданном технологическом режиме.
- 5. Температура стеклования.** Важной физико-химической характеристикой полимера (резиста) является температура стеклования T_g . Резисты с низким значением T_g могут быть подвержены явлению *хладотекучести*, то есть искажению контуров проявленного изображения, они не стойки в высокотемпературных процессах и имеют повышенную микродефектность, вызванную растворением при проявлении низкомолекулярных фракций на участках, не подлежащих растворению.
- 6. Кроющая способность.** Одним из важных свойств электронорезистов является кроющая способность (КС), т.е. способность резистов

образовывать на микрорельефной поверхности пластин пленку равномерной толщины. Высокая КС электронорезистов обеспечивает необходимую однородность размеров элементов на выступах и впадинах пластины. Оценку КС электронорезиста проводят по тесту, выполняемому на полупроводниковой кремниевой пластине в виде трех типов топологии полупроводниковых структур, наиболее часто встречающихся в реальных условиях: 1 – одиночные (изолированные) выступы; 2 – одиночные впадины; 3 – чередующиеся выступы и впадины.

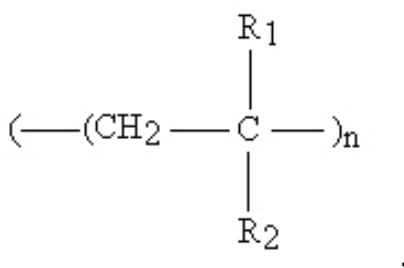
7. В практических случаях бывает важна также *стойкость резистивных материалов в различных режимах травления и при термической обработке.*

4.7.2. Характеристики промышленных электронорезистов

Под действием излучений высоких энергий (электронов) полимерная основа позитивного резиста подвергается деструкции, а негативного – межмолекулярной сшивке. Деструктированные участки позитивного резиста имеют повышенную растворимость в проявителе по сравнению с неэкспонированными, а у негативных резистов – наоборот.

Позитивные электронорезисты

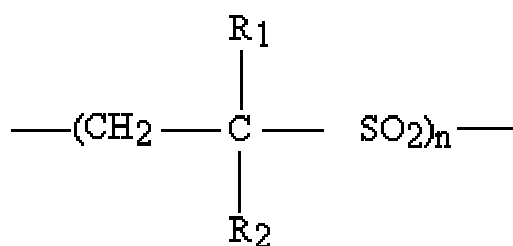
Основным классом позитивных электронорезистов являются полимеры – производные полиметилметакрилата (РММА) с общей формулой:



где R_1 и R_2 – алифатические либо ароматические заместители (для РММА R_1 это $-\text{CH}_3$, а R_2 соответственно $-\text{COOCH}_3$). Электронный РММА обладает высокой разрешающей способностью и прекрасными пленкообразующими и маскирующими свойствами. Однако чувствительность его недостаточно высока. Причиной низкой чувствительности является небольшой радиационно-химический выход деструкции $G_s = 1,3 \dots 1,7$. Замещая метильную группу R_1 или эфирную группу R_2 , можно модифицировать РММА и повысить значение G_s . При этом в ряде случаев чувствительность электронорезистов возрастает почти на порядок, но ухудшаются другие его параметры – разрешающая способность и термостойкость. Повысить чувствительность РММА удалось, благодаря

увеличению поглощенной энергии облучения, которое наблюдается при введении в состав полимера атомов тяжелых металлов. Особую группу производных РММА составляют позитивные резисты, имеющие в своем составе структурные единицы, способные к сшиванию, которые при термообработке пленки образуют более или менее прочные межмолекулярные связи, противостоящие действию проявителя. При экспонировании таких резистов происходит деструкция как основной цепи полимера, так и образованных при термообработке связей, и резист на облученных участках снова становится растворимым. Достоинством данных резистов является более высокая устойчивость к высокотемпературным процессам.

К позитивным электронорезистам относятся также полиолефинсульфоны – сополимеры диоксида серы с олефинами с общей формулой:



где R_1 , либо ---H , либо ---CH_3 , а R_2 – алифатический или ароматический заместитель. Полимеры данного класса характеризуются экстремально высоким для позитивных материалов радиационно-химическим выходом деструкции (10...12), который в несколько раз выше, чем для производных РММА. По чувствительности алифатические полисульфоны более чем на порядок превосходят РММА.

Негативные электронорезисты

Они более чувствительны, чем позитивные, хотя обладают меньшей разрешающей способностью. В качестве негативных электроночувствительных материалов применяют сополимеры глицидилметакрилата (ГМА) с соединениями винилового и акрилового рядов, радиационно-химический выход G_s которых в 30...100 раз выше, чем значение G_s у полимеров позитивного типа. При введении в полимеры радиационно-стойких сомономеров, таких как стирол, фенилакрилат и другие, удалось повысить термическую и плазмохимическую устойчивость негативных резистов, но при этом чувствительность несколько снизилась. К классу негативных электронорезистов относят сополимеры и различные производные бутадиена и изопрена. По чувствительности они не уступают сополимерам ГМА, но по контрасту и разрешающей способности значительно хуже. Хорошо известны также негативные электронорезисты на основе кремнийорганических

соединений, а также сополимеров сложного строения с разветвленными боковыми цепями, содержащими винильные и эпоксидные группы.

В общем, следует отметить, что разрешающая способность всех типов электронорезистов в среднем выше, чем у фоторезистов общего применения.

4.7.3. Шаблоны для ЭЛЛ

Для субмикронной проекционной ЭЛЛ создают шаблоны на тонких мембранах, которые прозрачны для электронов и служат основой для нанесения на нее маски. Материал мембраны должен обеспечивать прохождение электронов с минимальным рассеянием, обладать необходимой механической прочностью, технологическими и физическими характеристиками, позволяющими создавать на поверхности мембраны доброкачественное масочное покрытие. В качестве мембран для масок используются в основном кремний и его соединения, а в качестве маскирующих покрытий – золото, платина и некоторые другие металлы.

4.7.4. Механизмы и закономерности реализации электронно-лучевой литографии

При экспонировании электронорезиста происходит рассеяние электронного пучка на ядрах его атомов и орбитальных электронах. Так как толщина слоя электронорезиста обычно мала (0,3-1,0 мкм), пучок электронов проходит через него и рассеивается в нижележащем слое и подложке. При этом наблюдается прямое и обратное рассеяние электронов, суммарное действие которого расширяет область экспонирования по сравнению с первичным пучком. Так, при диаметре пучка $d_0 = 50$ нм, толщине слоя электронорезиста 0,5 мкм и энергии 20 кэВ диаметр рассеянного пучка электронов будет равен 200 нм. При попадании электронного пучка в тонкий полимерный слой электроны при упругих и неупругих столкновениях теряют свою энергию. Эти процессы называют **рассеянием электронов**. При таком рассеянии возникает поперечный поток электронов в направлении, перпендикулярном направлению падающего пучка. При прохождении пучка электронов в подложку в ней также происходят рассеяние и отражение электронов (обратное рассеяние). Характеристики рассеяния зависят от энергии, тока и геометрии электронного пучка, толщины слоя электронорезиста и материала подложки. Обратное рассеяние оказывает влияние на экспонирование электронорезиста. Поэтому участки слоя электронорезиста, нанесенные на различные по составу слои получают разные дозы облучения и будут проявляться по-разному.

Таким образом, характеристиками рассеяния электронов в слое электронорезиста определяется форма клина проявления, которая зависит также от энергии воздействующих электронов, типа электронорезиста (позитивный или негативный), его толщины и состава слоев на подложке.

Формы клина проявления электронорезиста зависят от толщины его слоя. Если пучок электронов проходит через слой электронорезиста и не успевает рассеяться, так как его толщина мала, а энергия электронов велика, то клина проявления не будет, а форма проявленной структуры будет близка к вертикальной. Когда рассеяние электронов происходит в основном в объеме слоя электронорезиста большой толщины, после проявления форма его клина повторяет форму и области рассеяния электронов (трапецеидальный профиль).

Сильное рассеяние электронов искажает не только размеры проявленных областей, но и вызывает взаимное влияние близко расположенных элементов изображения. Такое влияние называют *эффектом близости*.

Эффект близости является самым значительным ограничением в электронолитографии по точности переноса изображения и формирования элементов малых размеров. Суть его заключается в том, что близко расположенные электронные пучки за счет их рассеяния сливаются в единый эквивалентный профиль, что приводит к слиянию близко расположенных элементов топологии.

В электронолитографии применяют два способа непосредственного формирования элементов изображения на полупроводниковых подложках: последовательной экспозицией тонким сфокусированным электронным пучком круглого сечения (сканирующий способ) и последовательным экспонированием прямоугольным пучком переменного сечения (электронно-наборный способ). Последний способ можно реализовать через маску.

По сравнению с фотолитографией электронолитография обладает следующими преимуществами:

1. Имеет принципиально более высокую разрешающую способность, обусловленную малым влиянием дифракционных явлений.
2. Пучок электронов можно отклонять и управлять им с помощью электрических или магнитных полей, в том числе и по программе, заложенной в ЭВМ.
3. Электронный пучок можно сфокусировать с помощью магнитных линз в тонкий луч однородной плотности или формировать с помощью диафрагм прямоугольный пучок электронов переменного сечения.
4. Глубина резкости электронно-оптических систем значительно больше, чем оптических проекционных, что существенно снижает требования к геометрии полупроводниковых подложек.
5. Так как электронно-лучевые системы размещаются в вакуумной рабочей камере, подложки в процессе экспонирования не загрязняются.

В настоящее время электронолитография рассматривается как реальная замена фотолитографии, но все же она имеет два главных недостатка:

1. При электронолитографии приходится вырисовывать каждый элемент

отдельно остро сфокусированным электронным пучком, что снижает производительность.

2. Формирование отдельных структур следует рассматривать как независимый процесс и чем процессов больше, тем вероятность случайной ошибки выше (и это уже регламентируется теорией вероятности, а не физическими закономерностями).

4.8. Нанолитография оптического диапазона

В методах преодоления дифракционного предела фотолитографии известны следующие процессы:

- коррекция оптической близости;
- введение искусственного фазового сдвига;
- иммерсия;
- двойное экспонирование и двойное создание микрорисунка («паттернирование»);
- внеосевое освещение фотошаблона;
- использование многослойного фоторезиста и силилирование в процессе проявления рисунка;
- взрывная фотолитография.

4.8.1. Коррекция оптической близости

При экспонировании микроизображения с размерами равными и меньшими предельного изображение претерпевает различного рода искажения. Это могут быть:

- сужение или недоэкспонирование узкой длинной линии;
- сокращение и округление ее концов;
- заплывание узких зазоров и острых углов и т.д.

С этими искажениями можно бороться, создавая упреждающие компенсирующие их элементы на фотошаблоне. На рис. 38 и 39 показаны для одного из вариантов шаблона угловые засечки для уменьшения скруглений и предотвращения укорачивания элементов рисунка, а также упреждающие локальные элементы для предотвращения сужения экспонируемой линии.

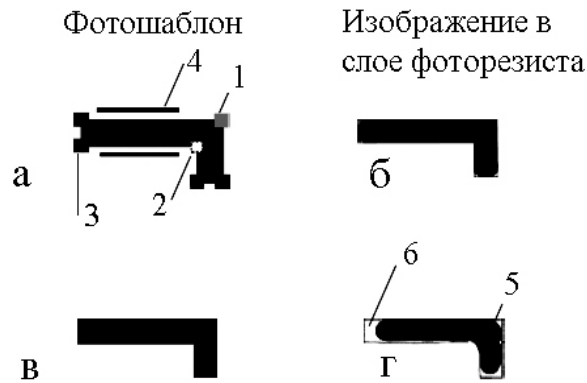


Рис. 38. Коррекция оптической близости на примере Г-образных структур: *a* и *в* – формы фотошаблонов, *б* и *г* – получаемые изображения в слое фоторезиста; 1, 2, 3 – варианты угловых засечек на фотошаблоне, 4 – упреждающая линия на фотошаблоне, 5 – угловое скругление изображения в слое фоторезиста, 6 – недоэкспонированная линия в слое фоторезиста

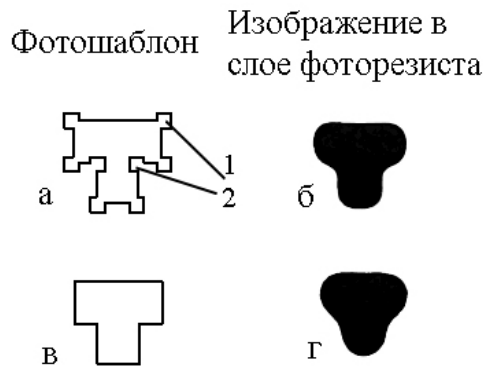


Рис. 39. Коррекция оптической близости на примере Т-образных структур: *a* и *в* – формы фотошаблонов, *б* и *г* – получаемые изображения в слое фоторезиста; 1, 2 – варианты угловых засечек на фотошаблоне

Их введение существенно усложняет фотошаблон и повышает требования к средствам их производства, но делает в конечном итоге рисунок топологического слоя приемлемым для штатного функционирования элемента ИС в условиях работы с размерами меньшими дифракционного предела. На производстве наработаны комплекты программ, позволяющие вводить в фотошаблон набор элементов, корректирующих эффекты оптической близости и моделировать результат их применения. Приемы коррекции эффектов оптической близости стали неотъемлемой частью технологического процесса СБИС и УБИС.

4.8.2. Введение искусственного фазового сдвига

Введение фазосдвигающих элементов – это еще один из мощнейших

приемов для работы с размерами элементов ИС, находящимися за гранью дифракционного предела. Он реализуется путем введения в структуру фотошаблона дополнительных элементов (наносится слой прозрачного материала с заданной толщиной и определенным коэффициентом преломления) или вытравливания канавки, сдвигающих фазу проходящего света. Идея проиллюстрирована на рис. 40, из которого видно, что волна электромагнитного излучения, проходящая сквозь фотошаблон на двух смежных участках микрорисунка, может проинтерферировать таким образом, что в случае разности фаз в 180° мы получим ноль сигнала. Оперируя различными вставками в фотошаблон, можно за счет волнового характера экспонирующего излучения получить дополнительную засветку или наоборот сделать затемнение на подложке.

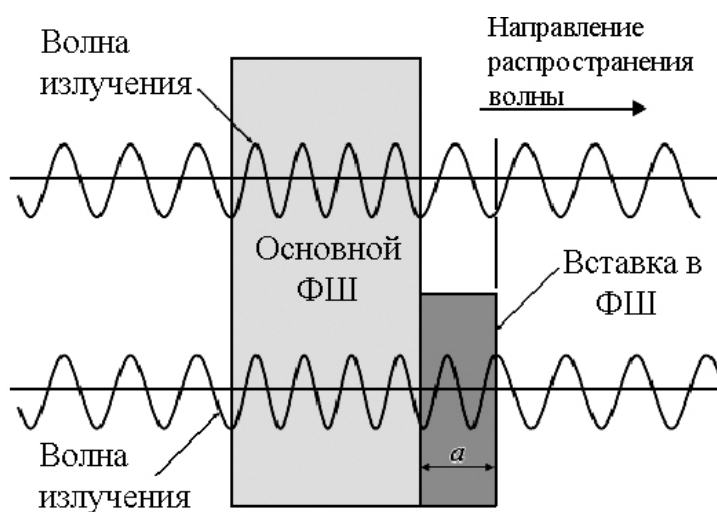


Рис. 40. Иллюстрация принципа работы фотошаблона с фазовым сдвигом: а – ширина фазосдвигающей вставки в составе основного фотошаблона (ФШ)

Существуют различные элементы фазосдвигающих вставок в фотошаблоны, называемые масками. К числу наиболее распространенных фазосдвигающих средств следует отнести элементы типа «фазовой границы» (PHE). Они годятся, прежде всего, для создания одиночных тонких линий. Например, маска с относительно широкой полосой прозрачного материала, вытравленная на фотошаблоне, при экспонировании создаст две темные предельно узкие полосы на обеих фазовых границах (рис. 41).

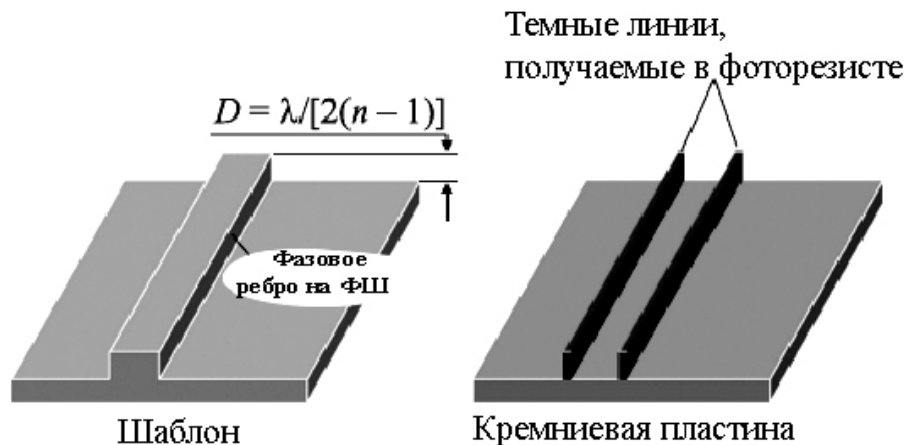


Рис. 41. Иллюстрация применения элемента «фазовая граница» в составе фотошаблона

4.8.3. Внеосевое освещение фотошаблона

Одним из важнейших элементов фотолитографического процесса является правильное освещение маски. Можно показать, что нормальное освещение маски с элементами меньше дифракционного предела не может способствовать правильному переносу изображения с шаблона (рис. 42). Действительно, при нормальном падении пучка света только нулевой порядок дифракции попадает в объектив, в то время как другие лучи (+1 и -1 порядки дифракции) выйдут за пределы поля зрения. Изображение не формируется, так как отдельный луч представляет собой плоскую волну, не несущую никакой пространственной информации. Когда освещающий пучок является наклонным, в оптику попадает, помимо луча нулевого порядка, еще и луч первого порядка. В таком случае рисунок формируется, более того, улучшается глубина резкости. Изображения, формируемые подобным образом объективами с меньшей числовой апертурой, обладают при этом большей глубиной резкости.

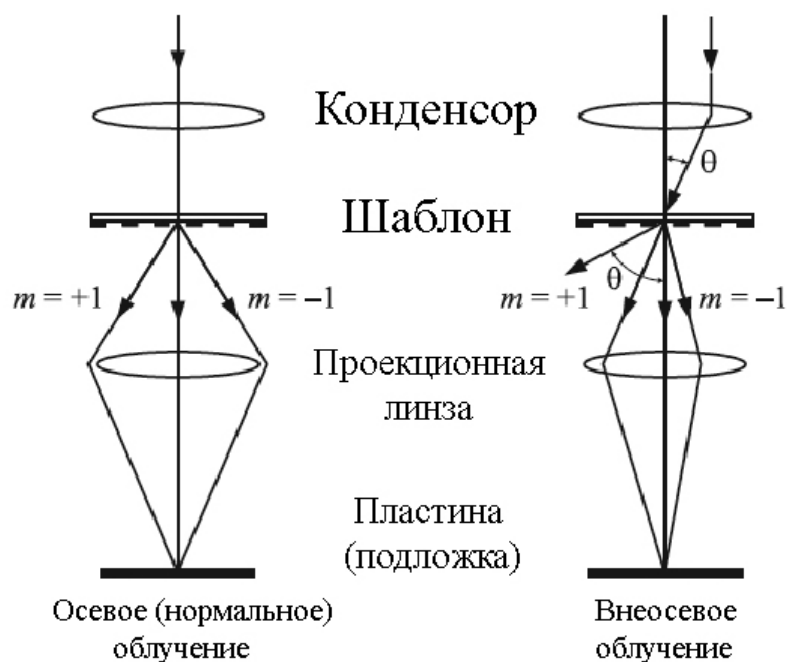


Рис. 42. Формирование изображения в оптических системах при различных способах освещения фотошаблона

4.8.4. Иммерсия

Иммерсирование дало мощный импульс развитию микроэлектроники и уменьшению минимального размера воспроизводимого в ИС элемента. Вполне применимой иммерсионной жидкостью является простая вода, которую необходимо впрыснуть в промежуток между объективом и полупроводниковой пластиной. Вода прозрачна на длине волны 193 нм и имеет при этом коэффициент преломления 1,44. Соответственно, длина волны эксимерного лазера в иммерсионной среде составит не 193, а 134 нм. Числовая апертура тоже увеличится: близкая к пределу наилучшая полученная величина числовой апертуры изображающего объектива на воздухе составляет 0,95, а с водяной иммерсией будет $NA = 0,95 \cdot n = 0,95 \cdot 1,44 = 1,368$. Однако использование воды привело к существенному падению выхода годных чипов по причине выделения растворенных в ней газов в форме пузырьков, что сдерживало практическое применение иммерсирования, пока не нашлись достаточно эффективные средства борьбы с их образованием. Более того, нашлись иммерсионные жидкости с коэффициентом преломления, бóльшим, чем у воды, но по разным причинам они на сегодняшний день не нашли широкого применения.

4.8.5. Двойное экспонирование и двойное паттернирование

Двойное экспонирование сводится к применению двух фотошаблонов с различными, дополняющими друг друга, микрорисунками при экспонировании

одного и того же слоя фоторезиста. Двойное паттернирование – это более радикальный прием: он состоит в поочередном создании двух взаимодополняющих микрорисунков, задаваемых парой согласованных фотошаблонов, причем фоторезист наносится, экспонируется и проявляется дважды, образуя два встроенных один в другой микрорисунка (pattern).

Такие технологии стали возможны лишь в результате разработки и усовершенствования нового класса фоторезистов, так называемых «химически усиленных» или «chemically amplified – CA» фоторезистов. CA резисты – это принципиально новый тип резистов, в которых основная фотохимическая реакция не является прямым следствием поглощения кванта излучения. Схема его работы следующая: с фотоном непосредственно реагирует фотокислотный генератор (photo acid generator – PAG), в небольшой пропорции, включаемый в состав резиста, который выделяет при этом кислоту, модифицируя звенья полимерной матрицы, делая их растворимыми. Важно при этом что, прореагировав со звеньями полимерной цепочки матрицы, PAG регенерируется наподобие катализатора, и так может происходить до 500-1000 раз, главным образом, в процессе постэкспозиционной термообработки. CA резисты отличаются высокой чувствительностью (10-50 мДж/см²), причем она сохраняется вплоть до очень коротких длин волн, включая дальний УФ, высокой разрешающей способностью и высоким контрастом передачи изображения. К известным недостаткам CA резистов, связанным с каталитической природой процесса, относится высокая вероятность прерывания реакции из-за отравления поверхности некоторыми загрязнениями воздушной среды между экспозицией и постэкспозиционной термообработкой. Эти резисты хорошо работают до проектных норм 20-30 нм.

4.8.6. Использование двухслойного резиста и силилирование

При изотропном проявлении микрорисунка необходимо наносить фоторезист толщиной не более минимального воспроизводимого размера элемента. Часто это входит в противоречие с его стойкостью по отношению к последующим воздействиям, необходимым для формирования ИС. Выходом из создавшегося положения является применение многослойных резистов, например двухслойного. При этом верхний слой делается тонким, обеспечивающим воспроизведение достаточно тонкого рисунка, тогда как нижний – выбирается по толщине, которая обеспечит достижение необходимой стойкости при проведении последующих операций, то есть делается существенно толще. Тогда возникает проблема сохранения точности микрорисунка в верхнем и нижнем слоях резиста. Эта задача может быть решена при анизотропном переносе изображения, например реактивным ионным травлением. Ее решение может быть обеспечено созданием между слоями некоторого пограничного слоя, обогащенного кремнием. Реализуется это следующим образом. Простая выдержка слоя с резистом в термостате с

теплым газообразным силаном (90°C) при давлении 250 Торр достаточна для диффузии силана на глубину до 300 нм в резист. Если затем поместить образец в кислородную плазму при давлении в 10 Торр, в кремнийсодержащих областях образуется двуокись кремния SiO_2 , а необработанные силаном области вытравятся. Маска SiO_2 далее прекрасно защитит слой резиста при переносе его изображения в нижний слой. Описанный процесс называют силилированием. Он эффективно применяется в планарной технологии кремниевых ИС. Возможны и другие реализации этого процесса, но главным остается внедрение кремния в резист и применение его оксида в качестве внесенной твердой маски для реактивного травления или окисления. На рис. 43 проиллюстрирован один из вариантов процесса силилирования. Нижний слой резиста в соответствии с технологией наносится первым, в котором вышеописанным способом формируется слой SiO_2 , но не до конца. Таким образом, вблизи подложки формируется задающий слой резиста. Верхний слой резиста необходим для формирования внесенной маски из SiO_2 и обеспечения реактивного травления резиста вблизи подложки.

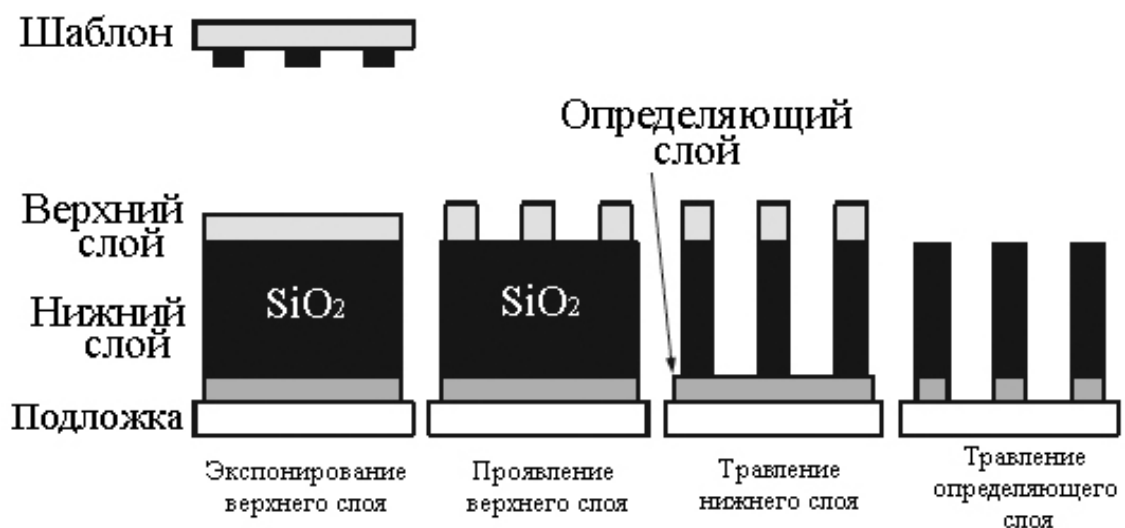


Рис. 43. Иллюстрация процесса силилирования

4.8.7. Взрывная фотолитография

Взрывная литография часто называется также обращенной литографией и отличается от прямой последовательностью этапов формирования металлизированных покрытий. В прямой литографии подложка первоначально покрывается слоем металла, а затем на металлический слой наносится пленка фоторезиста. После процессов экспонирования, проявления и травления металлический слой удаляется с незащищенных фоторезистом участков. В технологии обращенной литографии на подложку сначала наносится пленка фоторезиста. После процессов экспонирования и проявления в пленке

фоторезиста вскрываются участки, где предполагается осуществить металлизацию подложки. Затем вся поверхность, включая поверхность пленки фоторезиста и вскрытые участки подложки, покрывается металлом. На следующей стадии пленка фоторезиста удаляется с подложки с помощью растворителя вместе с осажденным на пленку металлом. Металлический слой сохраняется только на подложке во вскрытых окнах, формируя желаемый рисунок металлизации. Характерным признаком обращенной (взрывной) литографии является отсутствие стадии травления. Взрывная литография находит применение в тех случаях, когда использование химического или плазменного травления является нежелательным или несовместимым с технологической точки зрения. Примером может служить технология, где в качестве подложек используется арсенид галлия. Другая причина – это обеспечение надежного контроля над размерами элементов. Химическое травление является изотропным по своей природе. Вследствие этого, трудно контролировать ширину линии металла из-за его подтравливания под маской резиста. В технологии обращенной литографии травление отсутствует, и ширина формируемых металлических дорожек зависит только от разрешения пленки фоторезиста.

Стандартные позитивные фоторезисты невозможно использовать в обращенной литографии из-за положительного наклона профиля стенок резиста. Экспонирующее излучение при прохождении через пленку поглощается, в результате верхние слои пленки получают более высокую дозу энергии, чем нижние. Вследствие этого, верхние слои пленки будут быстрее растворяться в проявителе и окончательный профиль резиста после проявления становится пологим, уширенным сверху и уменьшенным внизу у подложки (положительный профиль). При последующем нанесении металла он будет осаждаться на боковых стенках пленки фоторезиста, что сделает затруднительным последующее удаление пленки фоторезиста растворением (рис. 44).

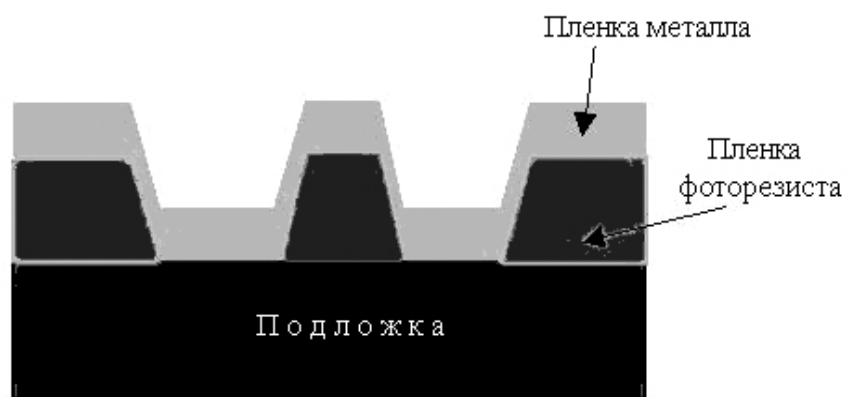


Рис. 44. Топология структуры в технологии взрывной литографии при использовании позитивного фоторезиста без обращения изображения

Для успешной реализации взрывной фотолитографии необходим отрицательный наклон профиля стенки фоторезиста. Достигается это с помощью обращения скрытого позитивного изображения. Для этого после основного экспонирования позитивного фоторезиста без его проявления проводят термический отжиг подложки при критических температурах, в результате чего сшитый мономер теряет свои защитные свойства, то есть теперь может быть относительно легко удален в жидкостных средах. Однако перед этим вся пластина повторно экспонируется без маски, в результате чего формируется обращенное изображение. После обработки подложки в растворителях получаем структуру, показанную на рис. 45.



Рис. 45. Результат проявления пленки позитивного фоторезиста после обращения скрытого изображения (формирование негативного изображения фотошаблона с отрицательным наклоном стенок)

Отрицательный наклон маски фоторезиста позволяет воспроизводимо удалять пленку металла, нанесенную посредством термического или плазмохимического напыления. На рис. 46 показана структура на подложке перед процессом взрывного проявления.

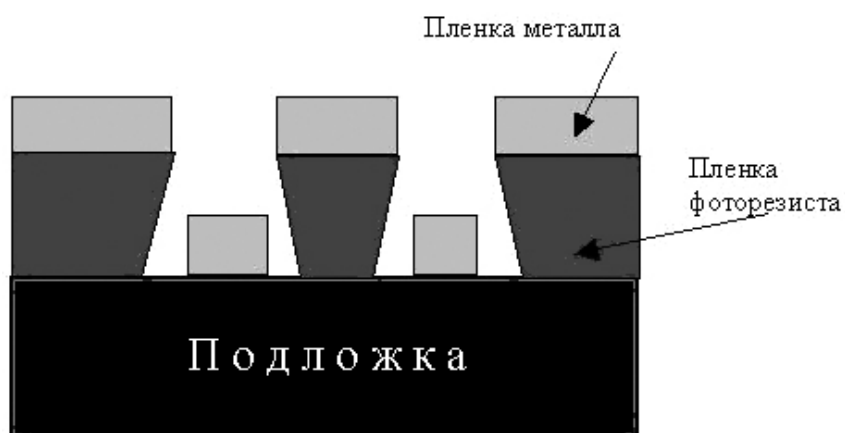


Рис. 46. Структура подложки перед операцией взрывного проявления и формирования металлических дорожек

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Тема. Фотолитография

Цель работы

1. Изучить теоретические основы фотолитографического процесса.
2. Получить основные практические навыки работы на фотолитографическом оборудовании и с жидким (аэрозольным) фоторезистом.
3. Познакомиться и практически закрепить знания о последовательности обработки подложек при проведении фотолитографии.

Применяемые материалы

1. Кислота плавиковая.
2. Гидроксид натрия.
3. Вода дистиллированная (бидистиллят).
4. Толуол.
5. Ацетон.
6. Бумага фильтровальная.
7. Вата медицинская гигроскопическая.
8. Пластины кремниевые *n*- или *p*-типа.

Оборудование, инструменты, приспособления и контрольно-измерительная аппаратура

1. Чашка керамическая.
2. Чашка стеклянная.
3. Пинцет пластиковый.
4. Установка нанесения фоторезиста методом центрифугирования (рис. 47).
5. Установка экспонирования (рис. 48).
6. Набор сменных фотошаблонов (масок).
7. Секундомер.
8. Оптический микроскоп.
9. Сушильный шкаф.

Задание и ход выполнения работы

Домашняя работа:

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Изучить теоретические сведения.
3. Подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

Последовательность работы в лаборатории

1. Подготовка пластин кремния к нанесению фоторезиста.
2. Провести последовательность операций фотолитографического процесса и получить на подложке топологию оксидной пленки, задаваемой шаблоном.
3. Проанализировать полученные образцы и выявить наиболее возможные причины возникновения брака.

Порядок выполнения работы

1. Подготовка пластин кремния к нанесению фоторезиста

- 1.1. Очистить поверхность образцов: при наличии на них загрязнений, последовательно в жирном растворителе (бензол, толуол, орто-ксилол или т.п.), а затем в ацетоне, используя при этом протирочную ветошь (вату) и пинцет, не допуская касаний поверхности пластины руками. Чистые образцы переносить на фильтровальной бумаге.
- 1.2. Высушить образцы на воздухе или в сушильном шкафу до полного их высыхания. Поверхность чистой сухой пластины должна быть без разводов и следов от остатков растворителей.

2. Провести последовательность операций литографического процесса и получить на подложке топологию оксидной пленки, задаваемой шаблоном

- 2.1. Получить у преподавателя окисленные образцы кремния, а у лаборанта емкость с промышленным фоторезистом и дозатор для его использования (в простейшем случае это может быть пипетка). Процесс нанесения фоторезиста на подложку осуществляется на установке, показанной на рис. 47.
- 2.2. Установить и зафиксировать кремниевую подложку в центре диска центрифуги 2 оксидной пленкой вверх. **ВНИМАНИЕ! Не рекомендуется касаться рабочей поверхности подложки руками.**
- 2.3. Установить защитный кожух центрифуги 4 так, чтобы вращающийся диск центрифуги 2 не касался его.
- 2.4. Включить тумблер центрифуги 1 и дождаться выхода ее на рабочий режим (10-15 сек).
- 2.5. Осторожно дозатором впрыснуть 2-3 капли фоторезиста в центральное отверстие защитного кожуха центрифуги 5.
- 2.6. Спустя 10-15 секунд выключить тумблер центрифуги 1 и дождаться ее полной остановки.
- 2.7. Снять защитный кожух центрифуги 4 и визуально убедиться в том,

что фоторезист равномерно распределился по всей поверхности подложки (если этого не произошло, подложка с фоторезистом считается бракованной и поступает на операцию исправления брака: весь фоторезист снимается с подложки растворителем и повторяется операция его нанесения до равномерного покрытия им всей плоскости подложки).

- 2.8. После успешного нанесения фоторезиста на подложку, ее подвергают сушке в два этапа: первый – при затемнении при комнатной температуре в течение 10-15 минут; второй этап – в сушильном шкафу при температуре $90\pm 10^{\circ}\text{C}$ в течение 20-30 минут.

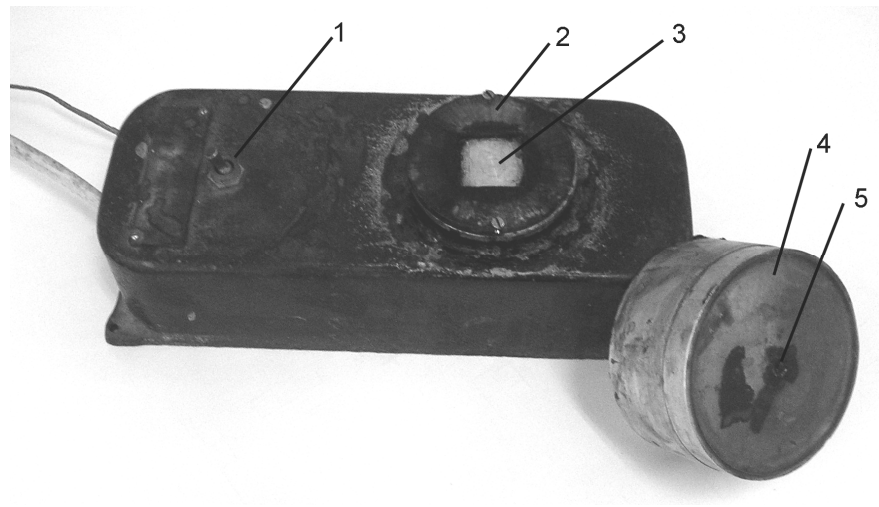


Рис. 47. Центрифуга для нанесения жидкого фоторезиста на подложку:
1 – тумблер включения/выключения; 2 – диск центрифуги,
3 – место для подложки; 4 – защитный кожух;
5 – отверстие для подачи фоторезиста

- 2.9. Провести операцию экспонирования слоя фоторезиста на установке, показанной на рис. 48.
- 2.10. Осторожно, не царапая пленку фоторезиста, провести процесс совмещения фотошаблона с подложкой.
- 2.11. Поместить подложку в установку экспонирования 2 так, чтобы слой фоторезиста был сверху.
- 2.12. Включить установку экспонирования, при этом в смотровом окне 1 можно будет наблюдать излучение ртутной лампы.
- 2.13. Проводить экспонирование, то есть засветку фоторезиста, строго определенное время (время экспонирования определяется мощностью светового потока и временем, поскольку освещенность в нашем случае есть величина постоянная, то оптимальная экспозиция будет зависеть только от времени, которое подбирается экспериментально и может изменяться от нескольких секунд до нескольких минут; рекомендуемое время экспонирования – 3 мин).

- 2.14. По окончании операции экспонирования выключить установку, снять фотошаблон с подложки и осторожно (пинцетом) извлечь подложку из установки.

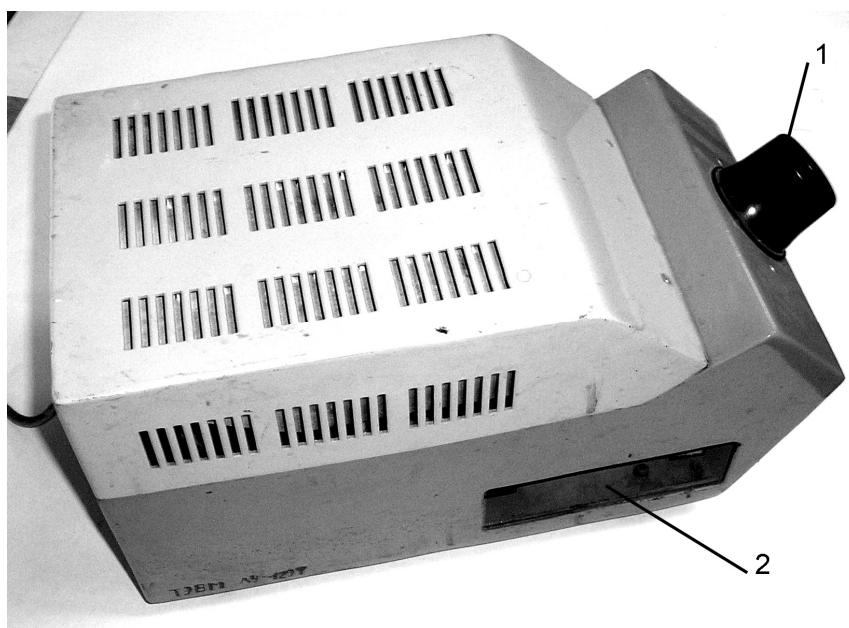


Рис. 48. Установка экспонирования УФ:
1 – смотровое окно; 2 – бункер для загрузки подложек с неэкспонированным фоторезистом

- 2.15. Поместить подложку в ванночку с проявителем и визуально наблюдать процесс проявления до четкого формирования на подложке топологии рельефа (для проявления позитивного фоторезиста использовать 1% раствор NaOH или KOH, для проявления негативного фоторезиста использовать трихлорэтилен; процесс ведется при комнатной температуре).
- 2.16. По окончании процесса проявления подложки промыть в дистиллированной воде и приступить к операции задубливания.
- 2.17. Обработанные подложки помещаются в сушильный шкаф для задубливания на 30 минут при температуре 150-180°C.
- 2.18. Далее осторожно извлечь подложки из сушильного шкафа, в течение 3-5 минут дать им остыть до комнатной температуры и затем приступить к операции травления технологического слоя на подложке (в данном случае слоя SiO₂).
- 2.19. Подготовить керамическую ванночку для травления, заполнив ее соответствующим травителем (для слоя SiO₂ использовать 45%-ю плавиковую кислоту. **ВНИМАНИЕ! Все операции с кислотами выполнять только под тягой с использованием пластикового пинцета**).
- 2.20. Осторожно пластиковым пинцетом перенести подложки в травитель

- и визуально наблюдать процесс травления (среднее время травления не должно превышать несколько минут).
- 2.21. После окончания процесса травления промыть подложки в дистиллированной воде.
 - 2.22. Подготовить стеклянную емкость для удаления пленки фоторезиста, заполнив его 10%-м раствором КОН (NaOH).
 - 2.23. Облучить подложки УФ-излучением без фотошаблона в течение нескольких минут, затем поместить их в стеклянную емкость с КОН (NaOH).
 - 2.24. Визуально наблюдать процесс удаления пленки фоторезиста (среднее время удаления пленки фоторезиста 1-1,5 мин).
 - 2.25. После полного удаления слоя фоторезиста подложки промыть в дистиллированной воде.
 - 2.26. Высушить подложки фильтровальной бумагой или при необходимости в сушильном шкафу при температуре 80-85°C. В результате должна получиться структура, возможный вариант которой (задается фотошаблоном) показан на рис. 49.

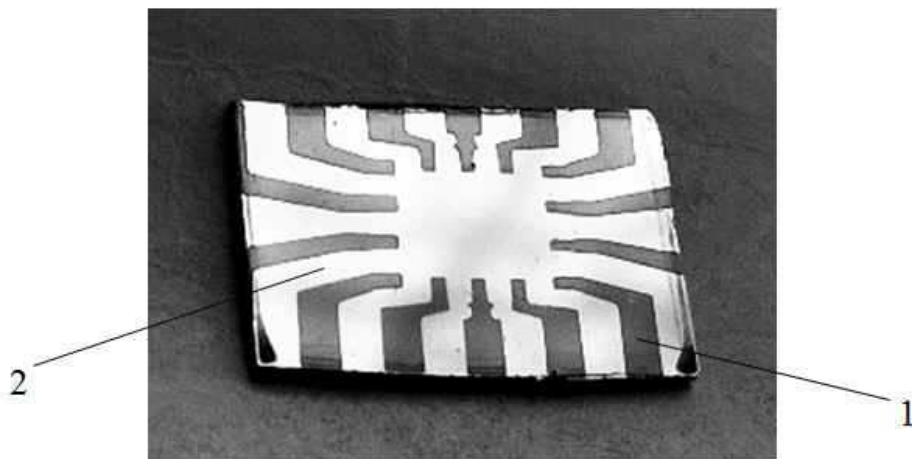


Рис. 49. Пример сформированной структуры на подложке:
1 – рисунок из SiO₂; 2 – кремниевая подложка

3. Проанализировать полученные образцы и выявить наиболее возможные причины возникновения брака

- 3.1. Произвести визуальный осмотр полученной топологии оксидной пленки на подложке, в случае наблюдения каких-либо дефектов, сделать необходимые выводы о возможных причинах их появления.

Контрольные вопросы к разделу "Процессы создания топологии микрорельефа в технологии микро- и нанoeлектроники"

1. Какова роль фотолитографии в технологии изготовления интегральных схем?
2. Дайте определение следующих терминов: литография, фотолитография, светочувствительный слой, технологический слой, контактная фотолитография, проекционная фотолитография, фотошаблон.
3. Что позволяют литографические процессы в рамках планарной технологии?
4. Перечислите основные достоинства литографических процессов.
5. Предложите классификационный признак (признаки) и классифицируйте литографические процессы согласно этим признакам.
6. Что такое фоторезист и из каких компонентов он состоит?
7. Объясните основные функции, выполняемые фоторезистом.
8. Поясните разницу между позитивным и негативным фоторезистом.
9. Что такое сухой пленочный фоторезист?
10. Перечислите и охарактеризуйте основные свойства фоторезиста.
11. Какие требования предъявляются к фоторезистам?
12. Охарактеризуйте технологическую операцию нанесения слоя фоторезиста (назначение, возможности, виды технической реализации, преимущества и недостатки различных видов нанесения жидких (аэрозольных) фоторезистов).
13. Охарактеризуйте технологическую операцию сушки фоторезистивного слоя (назначение, возможности, виды технической реализации, преимущества и недостатки различных видов сушки).
14. Охарактеризуйте технологическую операцию задубливания фоторезистивного слоя (назначение, возможности, виды технической реализации).
15. Охарактеризуйте технологическую операцию совмещения и экспонирования в цикле литографической обработки поверхности подложек (назначение, возможности, виды технической реализации).
16. Какие типы фотошаблонов вам известны?
17. Охарактеризуйте технологическую операцию проявления слоя фоторезиста (назначение, возможности, виды технической реализации).
18. Охарактеризуйте химические процессы и механизм технологической операции проявления негативного фоторезиста.
19. В чем преимущества цветных фотошаблонов?
20. Охарактеризуйте химические процессы и механизм технологической операции проявления позитивного фоторезиста.
21. Охарактеризуйте технологическую операцию травления технологического слоя через маску фоторезиста.

22. Охарактеризуйте технологическую операцию удаления резистивной маски (назначение, цель, возможности, виды технической реализации).
23. Охарактеризуйте основные причины и виды брака при реализации литографического процесса.
24. Перечислите и охарактеризуйте факторы, ограничивающие разрешающую способность фотолитографического процесса.

5. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИФФУЗИЯ ПРИМЕСИ В ОБЪЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПОДЛОЖКИ

5.1. Процессы, определяющие диффузию примесей

Диффузия примесей играет важнейшую роль в планарной технологии изготовления полупроводниковых приборов и используется для легирования полупроводниковых пластин с целью создания *p-n* переходов планарных структур.

Диффузия – это обусловленное тепловым воздействием перемещение частиц в направлении убывания их концентрации. Скорость диффузии зависит от градиента концентрации атомов примеси: чем он больше, тем интенсивнее перемещение атомов.

Применение методов диффузии в сочетании с маскированием, фотолитографией, эпитаксией, ионным легированием позволяет создавать сложные интегральные приборы и микросборки. Практически для осуществления диффузии используются источники примеси в газообразном, жидком или твердом состоянии, которые располагаются либо вблизи границ полупроводника, либо доставляются к его поверхности потоком газа-носителя. Затем пластина полупроводника нагревается и выдерживается при высокой температуре. При этом на определенной глубине создается желаемое распределение атомов примеси, что приводит к изменению величины удельного сопротивления полупроводника, или тип проводимости исходного полупроводника меняется на этой глубине на противоположный.

В реальных кристаллах предполагается три основных механизма диффузии:

- а) диффузия по вакансиям;
- б) диффузия по междоузлиям;
- в) обменная диффузия (взаимный обмен местами – эстафетный и краудионный механизмы).

Для легирования наиболее широко применяемого в планарной технологии кремния используются, в основном, элементы третьей и пятой групп периодической таблицы Д. И. Менделеева. В этом случае диффузия идет по вакансиям. Атомы этих групп, попадая в решетку кремния, занимают места в узлах кристаллической решетки, образуя твердые растворы замещения.

Суть этого механизма состоит в следующем: при высоких температурах (900-1200°C) в кремнии резко увеличивается количество вакансий (пустых, незанятых узлов решетки), которые могут перемещаться по кристаллу, оказываясь рядом с атомами примеси. В этом случае атом примеси может перейти на место вакансии, преодолев сравнительно небольшой энергетический барьер, и передвинуться по решетке в направлении убывания концентрации примеси.

Диффузия в кремний атомов элементов из других групп периодической таблицы, имеющих малые радиусы, большей частью идет по междоузлиям, т.е. образуются твердые растворы внедрения. Вероятность перехода атомов примеси в таком растворе из одного междоузлия в соседнее намного выше вероятности перехода атома из одного узла в соседний. Поэтому диффузия таких элементов происходит существенно быстрее, чем диффузия атомов элементов третьей и пятой групп. Однако в междоузельном пространстве может разместиться значительно меньше атомов, чем на вакансиях, что обуславливает малую растворимость примеси. Поэтому можно полагать, что в кремнии элементы третьей группы лучше растворимы, чем элементы, например, второй группы. Это необходимо учитывать при проведении процессов диффузии в реальных условиях. Таким образом, при междоузельном механизме атом переходит из одного положения в другое, не попадая при этом в узлы кристаллической решетки, то есть происходит прямое перемещение атомов по междоузлиям. Элементы I и VI групп, имеющие малый ионный радиус по сравнению с межатомным расстоянием в подложке, относятся к быстродиффундирующим примесям в кремнии, их диффузия происходит по механизму прямого перемещения атомов по междоузлиям.

Если движение междоузельных атомов таково, что в процессе перемещения они вытесняют атом из узла решетки и замещают его, а вытесненный атом, в свою очередь, становится междоузельным – то такой механизм перемещения собственных или примесных атомов называют механизмом непрямого перемещения атомов по междоузлиям или **эстафетным механизмом**, который относится к группе обменного механизма диффузии.

К этой же группе относится краудсионный механизм перемещения атомов в полупроводнике, характеризующийся тем, что междоузельный атом, вытесняя атом, находящийся в узле, смещает его на период решетки.

5.2. Виды и источники легирующих примесей

Наиболее часто в качестве легирующих примесей используют элементы

Ш и V групп периодической системы. Для кремния это бор (В) – акцепторная примесь, создающая области *p*-типа электропроводности, а также фосфор (Р), мышьяк (As) и сурьма (Sb) – донорные примеси, создающие области *n*-типа.

Количество примеси, которое можно ввести в пластину кремния, не превышает ее предельной растворимости при данной температуре в этом полупроводнике (табл. 14).

Таблица 14

Растворимость атомов химических элементов, используемых в качестве источников легирующей примеси, в кремнии

Примесь	Максимальная растворимость, ат/см ³	Температура, °С
Бор	$5 \cdot 10^{20}$	1200
Фосфор	$1,3 \cdot 10^{21}$	1150
Сурьма	$6 \cdot 10^{19}$	1300
Мышьяк	$2 \cdot 10^{21}$	1150

Важное значение имеет диффузия так называемых неконтролируемых примесей (меди, железа, золота, алюминия и др.), которые могут попадать в приповерхностный слой полупроводниковых пластин из оснастки, отмывочных сред и т.д. Скорость диффузии этих примесей в кремнии достаточно велика и может привести к нежелательным изменениям свойств активных областей будущих полупроводниковых приборов. Это определяет жесткие требования к чистоте проведения диффузионных процессов, исключающие возможность попадания в рабочий объем диффузионного реактора неконтролируемых примесей.

Источники легирующих примесей могут быть в твердом, жидком и газообразном состоянии.

Так, источниками бора служат:

- твердые B_2O_3 и H_3BO_3 ;
- жидкий BBr_3 ;
- газообразные галогениды бора BCl_3 , BF_3 , BI_3 и диборан (B_2H_6).

Источниками фосфора могут быть:

- твердые – оксид фосфора (P_2O_5), дигидрофосфат аммония ($NH_4H_2PO_4$), гидрофосфат аммония ($(NH_4)_2HPO_4$), а также очень редко элементарный красный фосфор (Р);
- жидкие – оксихлорид фосфора ($POCl_3$), галогениды фосфора PBr_3 и PCl_3 ;
- газообразный фосфин (PH_3).

В качестве источника мышьяка применяют:

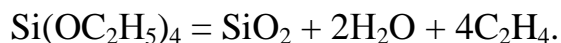
- твердые – порошок кремния, легированный мышьяком до предела растворимости, оксид мышьяка (As_2O_3);
- газообразный арсин (AsH_3).

Для диффузии сурьмы используют:

- твердые – оксид сурьмы (Sb_2O_3);
- газообразный стибин (SbH_3).

В настоящее время большое распространение получили поверхностные источники легирующей примеси. Это:

- слои примесно-силикатных стекол, наносимых на поверхность полупроводниковых пластин из жидких растворов – эмульсионных или путем прямого окисления кремния в присутствии источника лигатуры, например, кипящих смесей фосфорной (H_3PO_4) и азотной кислот (HNO_3), с последующим отжигом пластин с целью стеклования поверхностного источника примеси;
- пленкообразующие составы, содержащие источник легирующей примеси. Достаточно часто в этом случае используют тетраэтоксисилан, способный разлагаться с образованием SiO_2 в интервале температур 650-700°C:



Легирующую примесь вводят в исходный пленкообразующий состав в виде спиртовых растворов фосфорной кислоты (примесь *n*-типа) или борной кислоты H_3BO_3 (примесь *p*-типа);

- пластины из материалов, содержащих легирующую примесь, например, пластины из нитрида бора (BN), имеющие те же размеры, что и рабочие полупроводниковые пластины. Их устанавливают в кассету, чередуя с полупроводниковыми пластинами, и нагревают в потоке азота с кислородом. Легирующая примесь испаряется и попадает на рабочую полупроводниковую пластину;
- порошкообразные метафосфаты, например, метафосфат алюминия, загружаемый в лодочки из алюминиевой керамики в высокотемпературную зону диффузионного реактора и дающие при разложении оксид фосфора:



Оксид фосфора за счет потока газа переносится на поверхность

полупроводниковой пластины. Оксид алюминия остается в лодочке;
– композиционные соединения, типа SiP_2O_7 , также разлагающиеся при нагревании с образованием лигатуры:



Спиртовые растворы этих композитов либо непосредственно наносят на поверхность полупроводниковых пластин, либо изготавливают из них поверхностные источники.

5.3. Уравнение диффузии

Если в объеме полупроводника имеется неравномерно распределенная примесь и существует градиент концентрации, то в процессе диффузии возникает направленный диффузионный поток, который стремится выравнять концентрацию. Поток примеси будет направлен в сторону убывания концентрации.

Математическое описание диффузионных процессов было впервые дано немецким ученым А. Фиком в виде двух уравнений. Первое уравнение Фика характеризует процесс массопереноса вещества в твердом теле и отражает в одномерном случае тот факт, что поток F примесных атомов в направлении x через единичное поперечное сечение пропорционален градиенту концентрации примеси $\frac{dN(x,t)}{dx}$ в этом направлении:

$$F(x,t) = -D \frac{dN(x,t)}{dx}, \quad (2)$$

где $F(x, t)$ – поток примесных атомов, проходящих за единицу времени через единичное поперечное сечение, перпендикулярное направлению перемещения примеси; D – коэффициент диффузии примеси; t – время диффузии.

Знак минус означает, что поток направлен в сторону уменьшения градиента концентрации.

Рассматривая баланс примеси в слое полупроводника толщиной Δx и переходя к бесконечно малой толщине, можно с учетом (2) получить второе уравнение Фика, которое отражает зависимость концентрации примеси по глубине пластины x от времени t . Для случая, когда коэффициент диффузии является скалярной величиной и не зависит от направления и концентрации примеси, второе уравнение Фика имеет вид:

$$\frac{dN(x,t)}{dt} = D \frac{d^2 N(x,t)}{dx^2} \quad (3)$$

Уравнение (3) называется уравнением диффузии и является основным в полупроводниковой технологии при решении одномерных задач. Коэффициент диффузии, входящий в (3), является константой, характеризующей скорость диффузии. С ростом температуры в полупроводниках коэффициент диффузии обычно резко возрастает. Эта зависимость определяется выражением Аррениуса:

$$D = D_0 \exp(-E / kT), \quad (4)$$

где D_0 – постоянная величина, имеющая размерность коэффициента диффузии и зависящая от рода примеси и материала полупроводниковой пластины, $\text{см}^2/\text{с}$; E – энергия активации примеси, эВ; $k = 8,63 \cdot 10^{-5}$ – постоянная Больцмана, эВ/К; T – температура диффузии, К.

Величины D_0 и E для наиболее распространенных примесей в кремнии представлены в табл. 15.

Таблица 15

Величины D_0 и E для некоторых примесей в кремнии

Тип электропроводности	Примесь	D_0 , $\text{см}^2/\text{с}$	E , эВ
Дырочный (p -тип)	Бор (В)	10,6	3,6
Электронный (n -тип)	Фосфор (Р)	10,5	3,7
	Мышьяк (As)	0,44	3,6
	Сурьма (Sb)	4,0	3,9

В процессе изготовления интегральных полупроводниковых схем по известному коэффициенту диффузии определяют основные параметры диффузионного процесса: распределение концентрации примесей по глубине, толщину диффузионного слоя, время диффузии. Для этого требуется решение уравнения (3) при определенных начальных и граничных условиях, соответствующих реальным процессам диффузии. Практически при создании интегральных схем представляют интерес два случая диффузии: из *бесконечного* и *ограниченного источников примеси*. При обычных условиях, когда примеси диффундируют в полупроводник, ни одна из них не достигает противоположной границы. Поэтому выбирается модель полубесконечного твердого тела, ограниченного плоскостью $x = 0$.

5.4. Диффузия из бесконечного источника примеси

Важное практическое значение имеет случай, когда на границе полубесконечного тела (на поверхности пластины) поддерживается постоянная концентрация диффундирующей примеси N_s . Такой процесс диффузии нашел широкое распространение при изготовлении диффузионных p - n переходов. Начальное ($t = 0$) и граничное ($x = 0$) условия запишутся так:

$$\begin{aligned} N(x > 0, 0) &= 0; \\ N(0, t \geq 0) &= N_s. \end{aligned}$$

Для этого случая решение уравнения диффузии (3) имеет вид:

$$N(x, t) = N_s \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right), \quad (5)$$

где $N(x, t)$ – распределение концентрации диффундирующей примеси по глубине x полупроводника с течением времени t ; $\operatorname{erfc} \eta = 1 - \operatorname{erf} \eta$ – функция дополнительная до единицы интеграла ошибок Гаусса ($\operatorname{erf} \eta$);

$$\operatorname{erf} \eta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} \exp(-\eta^2) d\eta; \quad \eta = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}.$$

Величину \sqrt{Dt} , имеющую размерность длины, называют диффузионной длиной. Значения $\operatorname{erfc} \eta$ от η приведены в табл. 16.

Из выражения (5) следует, что распределение примеси по глубине x имеет вид, показанный на рис. 50, то есть при различных сочетаниях D и t можно получить различный закон распределения. Кроме того, при постоянной поверхностной концентрации N_s количество примеси, введенное в полупроводник (доза легирования), также зависит от температурно-временного воздействия (Dt). Дозу легирования P_0 , т.е. интегральное количество атомов примеси, введенное в полупроводник за время диффузии через площадку в 1 см^2 , можно получить следующим образом. Подставляя в уравнение (2) выражение (5) при $x = 0$, получим

$$F(x, t)|_{x=0} = -D \frac{N_s}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left[-\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)^2\right] = N_s \frac{D}{\pi t}. \quad (6)$$

Таблица 16

Функция дополнительная до единицы интеграла ошибок Гаусса

η	$\operatorname{erfc} \eta$	η	$\operatorname{erfc} \eta$	η	$\operatorname{erfc} \eta$	η	$\operatorname{erfc} \eta$
0	1,00000	1,00	0,15730	2,00	0,00468	3,0	0,0000225
0,10	0,88754	1,10	0,11980	2,10	0,00298	3,10	0,00001165
0,20	0,77730	1,20	0,08969	2,20	0,00186	3,20	0,00000603
0,30	0,67137	1,30	1,06599	2,30	0,00114	3,30	0,00000306
0,40	0,57161	1,40	0,04772	2,40	0,000689	3,40	0,00000152
0,50	0,47950	1,50	0,03390	2,50	0,000407	3,50	0,000000743
0,60	0,39614	1,60	0,02365	2,60	0,000236	3,60	0,000000356
0,70	0,32220	1,70	0,01621	2,70	0,000134	3,70	0,000000077
0,80	0,25790	1,80	0,01091	2,80	0,000075	3,80	0,000000035
0,90	0,20390	1,90	0,00721	2,9	0,000041	3,90	0,000000012

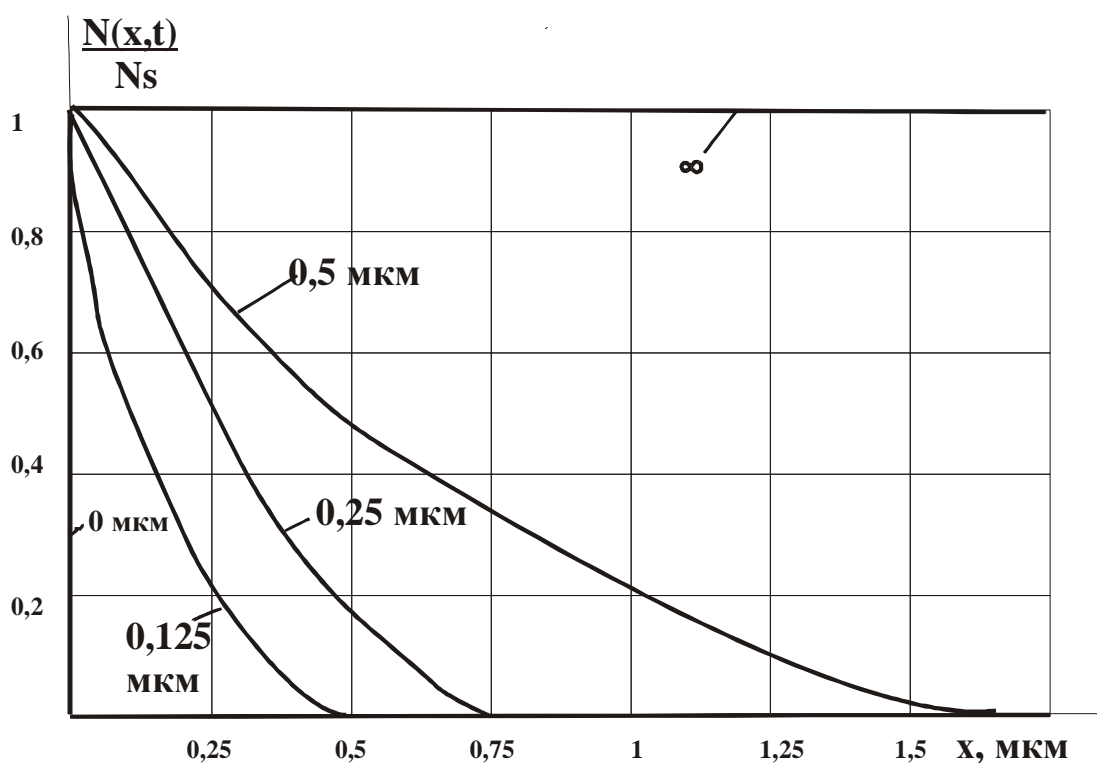


Рис. 50. Распределение примеси по глубине при ее загонке для полупроводниковой пластины при различных величинах диффузионной длины

Интегрируя (6) по времени, найдем интегральное количество примеси:

$$P_0 = \int_0^t F(x,t) dt = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_s \sqrt{Dt} \quad (7)$$

Таким образом, для уменьшения температурного воздействия поверхностную концентрацию выбирают максимально возможной, соответствующей предельной растворимости примеси при выбранной температуре диффузии.

Из рис. 51,а следует, что при температуре $T = 1150^\circ\text{C}$ складываются оптимальные условия для проведения диффузионного процесса с использованием фосфора $N_s \approx 1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ и бора $N_s = 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (соответствующие значения N_s и T отмечены пунктирными линиями). Повышение температуры процесса выше указанного оказывается нецелесообразным, так как при этом возможно формирование температурных дефектов.

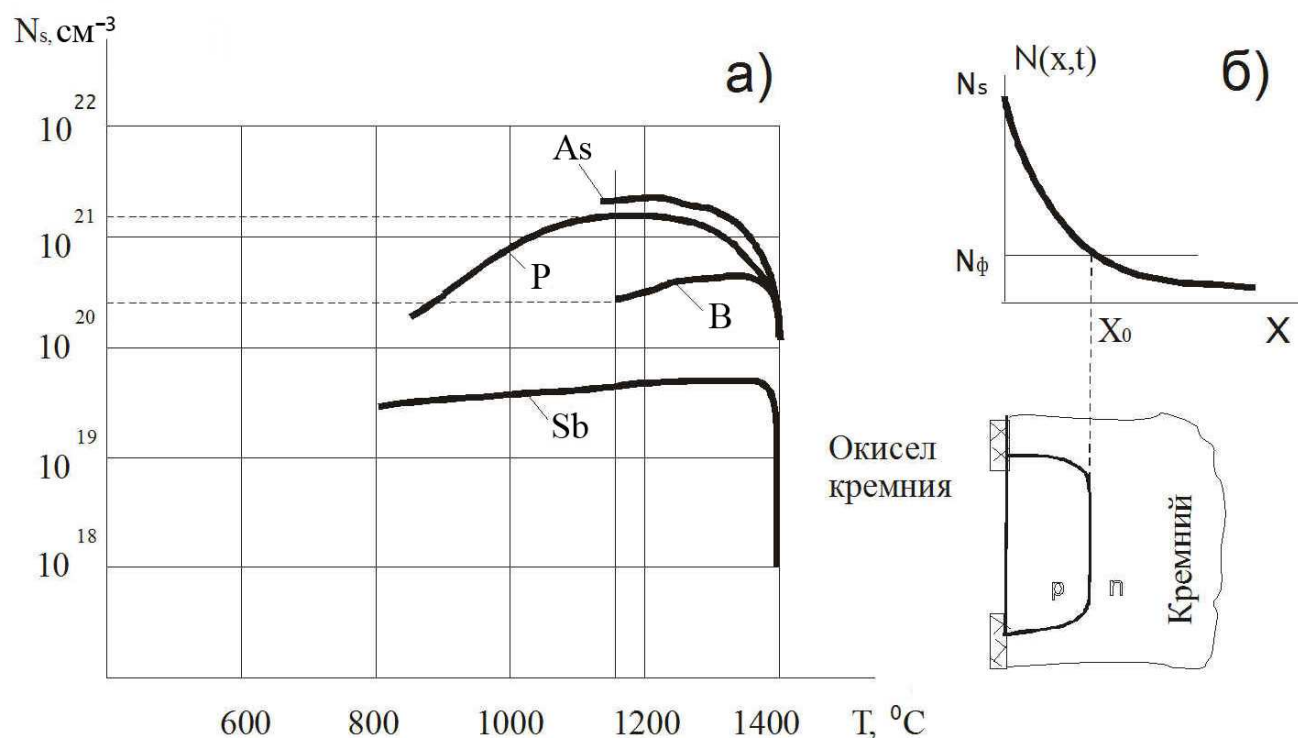


Рис. 51. Иллюстрация технологических приемов формирования $p-n$ перехода при постоянной и максимальной поверхностной концентрации примеси:

- а – диаграмма для выбора оптимальной температуры процесса (зависимость предельной растворимости примеси N_s от температуры),
- б – принцип формирования $p-n$ перехода

Обычно $p-n$ переход образуется на глубине x_0 , где концентрация введенной примеси $N(x,t)$ оказывается равной концентрации исходной примеси N_ϕ , как показано на рис. 51,б. Ввиду конечной скорости диффузии концентрация введенной примеси убывает в направлении от поверхности, через которую происходит диффузия, причем в примере на рис. 51,б показана диффузия примеси p -типа в кремний n -типа. Диффузия примеси происходит не

только в направлении x , но и в других направлениях. Поэтому боковые стенки p - n перехода при термической диффузии всегда расположены под слоем маскирующего окисла кремния. В качестве легирующих примесей для получения дырочной электропроводности можно использовать бор (В). Для получения электронной проводимости чаще всего применяются фосфор (Р), мышьяк (As) и сурьма (Sb). В качестве примера в табл. 17 приведены параметры диффузии бора и фосфора в кремнии.

Таблица 17

Технологические параметры проведения диффузионных процессов

Температура, °C	Бор		Фосфор	
	$D, \text{см}^2/\text{с}$	$N_s, 10^{20}, \text{см}^3$	$D, \text{см}^2/\text{с}$	$N_s, 10^{20}, \text{см}^3$
900	$8,0 \cdot 10^{-15}$	2,8	$8,0 \cdot 10^{-16}$	6,0
925	$1,5 \cdot 10^{-14}$	3,0	$2,0 \cdot 10^{-15}$	6,9
950	$3,0 \cdot 10^{-14}$	3,2	$4,0 \cdot 10^{-15}$	7,8
975	$5,0 \cdot 10^{-14}$	3,4	$7,0 \cdot 10^{-15}$	8,7
1000	$7,0 \cdot 10^{-14}$	3,6	$1,3 \cdot 10^{-14}$	9,6
1025	$1,3 \cdot 10^{-13}$	3,8	$3,0 \cdot 10^{-14}$	10,0
1050	$2,0 \cdot 10^{-13}$	4,0	$7,0 \cdot 10^{-14}$	10,8
1075	$3,0 \cdot 10^{-13}$	4,2	$1,0 \cdot 10^{-13}$	11,5
1100	$4,0 \cdot 10^{-13}$	4,4	$2,0 \cdot 10^{-13}$	12,2
1125	$7,0 \cdot 10^{-13}$	4,6	$2,6 \cdot 10^{-13}$	12,9
1150	$1,0 \cdot 10^{-12}$	4,8	$5,0 \cdot 10^{-13}$	13,6
1175	$1,5 \cdot 10^{-12}$	5,0	$1,0 \cdot 10^{-12}$	14,3
1200	$2,0 \cdot 10^{-12}$	5,2	$1,7 \cdot 10^{-12}$	15,0

При расчете технологического режима одноэтапной диффузии из бесконечного источника примеси требуется при заданной температуре T_s , поверхностной концентрации диффузанта N_s и концентрации атомов примеси в исходном материале (или фоновой концентрации) N_ϕ определить время диффузии, при котором обеспечивается заданная глубина залегания (x_0) p - n перехода или заданная толщина диффузионного слоя.

Для определения глубины залегания p - n перехода (x_0) уравнение (5) можно записать в виде:

$$N(x_0, t) = N_s \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0}{2\sqrt{Dt}} \right). \quad (8)$$

Из рис. 51,б видно, что при x_0 $N(x_0, t) = N_\phi$, то есть уравнение (8) принимает вид:

$$\operatorname{erfc}\left(\frac{x_0}{2\sqrt{Dt}}\right) = \frac{N_\phi}{N_s}. \quad (9)$$

Выражение (9) является основным для определения времени одноэтапной диффузии.

Рассмотренный математический аппарат часто используется для расчета времени загонки примеси (t в выражении 9); интегрального количества введенной примеси P_0 (в выражении 7), поступившей на единицу площади и распределения легирующего компонента по глубине после загонки примеси.

5.5. Диффузия из ограниченного источника примеси

В планарной технологии диффузию проводят в два этапа. Для окончательного формирования диффузионной области введенную на первом этапе примесь подвергают перераспределению. Этот второй этап диффузии, называемый разгонкой примеси, соответствует диффузии из конечного (или ограниченного) источника примеси.

Моделью этого этапа может служить диффузия из слоя толщиной Δh в полуограниченное тело. Предположим, что в этом слое, примыкающем к границе полубесконечного тела, имеется равномерно распределенная примесь с концентрацией N_s , а во всей остальной части тела при $x > \Delta h$ концентрация примеси равна нулю. Будем также считать, что поток примеси через границу $x = 0$ отсутствует. Такие границы принято называть отражающими. Примером отражающей поверхности может служить поверхность кремния, покрытая слоем двуокиси кремния. В этом случае начальные и граничные условия запишутся в виде:

$$\left. \frac{\partial N(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad \text{при } t \geq 0, x = 0; \quad (10)$$

$$N(x, 0) = N_s \quad \text{для } t = 0, 0 \leq x \leq \Delta h; \quad (11)$$

$$N(x, 0) = 0 \quad \text{для } t = 0, x > \Delta h. \quad (12)$$

В отличие от случая, описанного в п. 5.4, здесь диффузия ведется из ограниченного источника диффузанта. Можно показать, что это количество $P_0 = N_s \Delta h$, причем в процессе диффузии оно не меняется, а происходит лишь перераспределение его по объему тела. Если полагать, что при $\Delta h \rightarrow 0$ количество диффузанта P_0 в слое Δh не меняется, то решение уравнения диффузии (3) с учетом условий (10)-(12) запишется так:

$$N(x, t) = \frac{P_0}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right). \quad (13)$$

Полученное выражение (13) является функцией распределения Гаусса и отражает распределение примеси при диффузии из бесконечно тонкого слоя. На рис. 52 приведены кривые этого распределения для нескольких значений \sqrt{Dt} . Здесь же при $t = 0$ графически показано условие (11) для случая $\Delta h = 1$ мкм.

Для выполнения поставленных условий, как уже упоминалось ранее, на первом этапе проводят предварительную диффузию примеси (загонку) в течение небольшого промежутка времени. В результате на поверхности полупроводника образуется тонкий диффузионный слой с очень высокой поверхностной концентрацией, причем по всей глубине этого слоя загонки Δh концентрация должна быть почти равной поверхностной N_s , чтобы выполнялось условие (11). Однако с целью получения малых значений времени загонки и облегчения машинного расчета процесса диффузии полагают, что на границе слоя загонки $x = \Delta h$ концентрация примеси составляет $0,9N_s$.

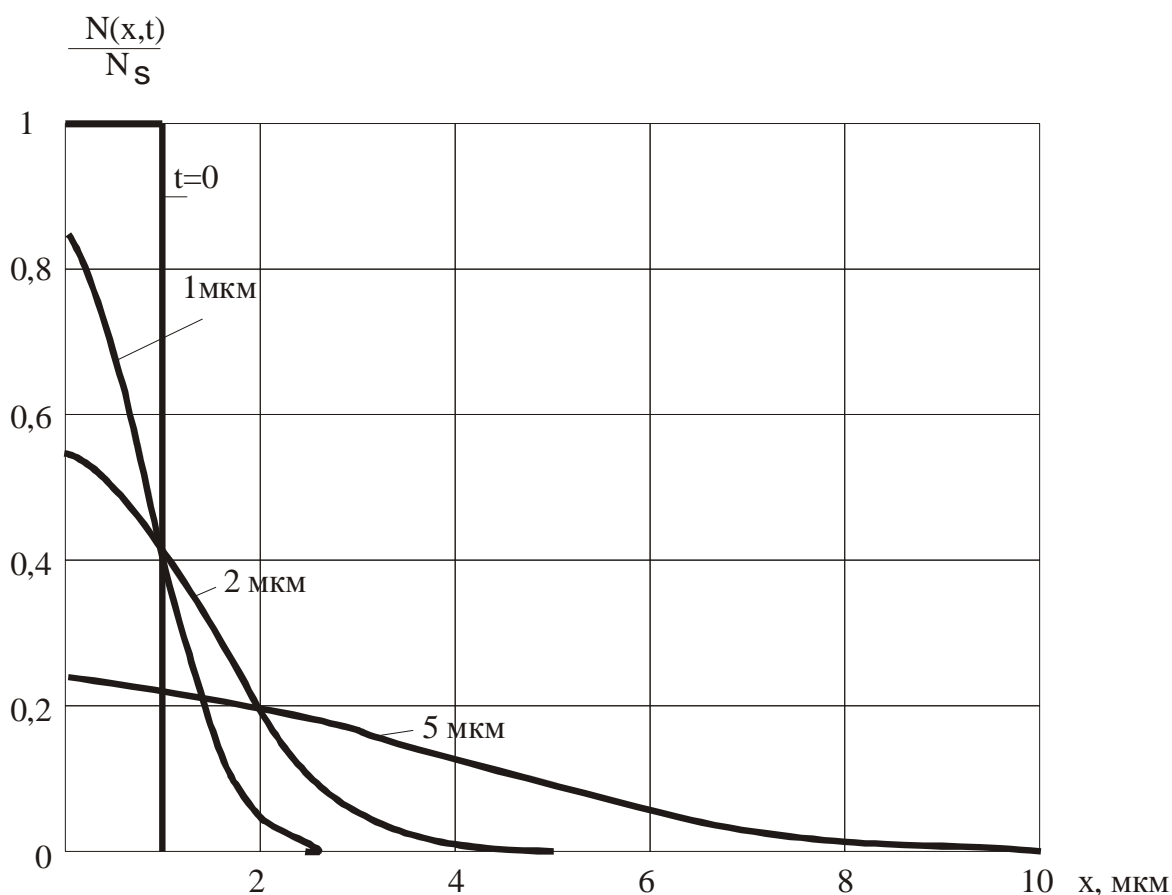


Рис. 52. Распределение примеси по глубине при ее разгонке для полупроводниковой пластины при различных величинах диффузионной длины

Второй этап диффузии (разгонка) производится при нагревании пластин полупроводника в окислительной среде. Образующаяся окисная пленка предохраняет поступление примеси извне и испарение ее наружу. Это

позволяет считать, что процесс диффузии идет в полуограниченном теле с отражающей границей из ограниченного источника $P_0 = N_s \Delta h$. При этом поступление примеси из окружающей среды отсутствует, и концентрация ее на границе $x = 0$ с течением времени убывает. Выражение (13) описывает истинное распределение при разгонке тем точнее, чем тоньше слой, из которого происходит диффузия, а это будет соблюдаться с увеличением времени разгонки, так как реальный источник примеси (слой Δh конечных размеров, созданный в приповерхностном слое полупроводника при загонке) постепенно иссякает с течением времени.

Диффузию проводят в сравнительно ограниченном диапазоне температур. Для кремния, например, это диапазон 1100-1250°C или с учетом процесса загонки при двухстадийной диффузии 1000-1250°C. Ниже 1000°C значения коэффициентов диффузии очень малы и глубина диффузии оказывается незначительной. Выше 1300°C качество диффузионных слоев неудовлетворительно.

В зависимости от способа введения в полупроводники диффузанта различают диффузию из газовой, жидкой и твердой фазы.

5.6. Диффузия из газовой фазы

Если в изолированный рабочий объем диффузионной установки поместить пластину полупроводника и примесный элемент и нагреть их до высокой температуры, то вследствие сублимации или испарения примесного элемента в рабочем объеме вскоре установится определенное парциальное давление его паров. Молекулы пара будут адсорбироваться всеми поверхностями, в том числе и поверхностью пластины, а при достаточно большой температуре будут диффундировать в объем пластины. Если скорость притока новых молекул взамен ушедших в полупроводник равна или больше скорости диффузии, а концентрация атомов в паре мала, то поверхностная концентрация определяется только парциальным давлением примесного пара. В идеальном случае равновесная концентрация пропорциональна давлению пара, поэтому управление поверхностной концентрацией осуществляют путем контроля давления пара.

5.7. Диффузия из жидкой фазы

При больших парциальных давлениях концентрация примеси в поверхностном слое может быть такой, что будет образовываться жидкая фаза. Практически различают два типа взаимодействий на поверхности: образование сплава и химическое взаимодействие.

Примесные элементы (например, алюминий, индий и галлий) могут быть нанесены на пластину полупроводника испарением в вакууме. При последующей диффузии на поверхности пластин в соответствии с фазовой диаграммой может образовываться жидкий сплав. При этом поверхностная

концентрация определяется только термодинамическими свойствами системы примесь-полупроводник и равна предельной растворимости примеси при данной температуре диффузии.

Второй тип взаимодействий на поверхности заключается в химической реакции донорной или акцепторной примеси с полупроводником. Обычно имеет место взаимодействие между полупроводником и жидкой поверхностной фазой, состоящей из окисла, например SiO_2 , первоначально присутствующего на полупроводнике, и донорного либо акцепторного окисла, используемого при диффузии. При температуре диффузии в реагирующей фазе устанавливается равновесная концентрация доноров или акцепторов. Скорость перехода примеси из этой фазы в полупроводник очень велика, и распределение примеси соответствует случаю источника с постоянной поверхностной концентрацией, как и при наличии сплава.

5.8. Диффузия из твердой фазы

Эта разновидность диффузионного процесса представляет собой диффузию из твердого раствора примеси в одной области полупроводника в примыкающую к ней другую область этого же полупроводника, свободную от примеси данного типа.

Таким образом, для диффузии из твердой фазы характерно наличие начального резкого перепада концентраций диффундирующей примеси. Структуры со ступенчатым начальным распределением примеси получают при выращивании эпитаксиальных пленок путем создания рекристаллизованного слоя при сплавлении или путем предварительного диффузионного или ионно-лучевого легирования тонкого поверхностного слоя полупроводника. Эти виды структур различаются по толщине легированного слоя, из которого идет диффузия.

5.9. Диффузия в замкнутом объеме

В этом случае пластины кремния помещаются совместно с некоторым количеством примеси в кварцевую ампулу, которая откачивается до давления 10^{-4} - 10^{-5} мм рт. ст. и запаивается. Иногда ампула заполняется чистым инертным газом. Далее ампулу выдерживают при высокой температуре определенное время, в течение которого идет процесс диффузии газообразной примеси в полупроводник.

Давление паров примеси, устанавливающееся над поверхностью полупроводника, определяет величину поверхностной концентрации, поэтому, изменяя концентрацию примеси в газовой фазе, можно менять в широких пределах поверхностную концентрацию примеси. Возможность такого управления процессами диффузии является существенным достоинством данного способа. Для изменения давления паров можно использовать конструкцию ампулы, представляющую собой замкнутую систему с отростком

(рис. 53). Изменением температуры примеси, находящейся в отростке, можно регулировать давление паров диффузанта.

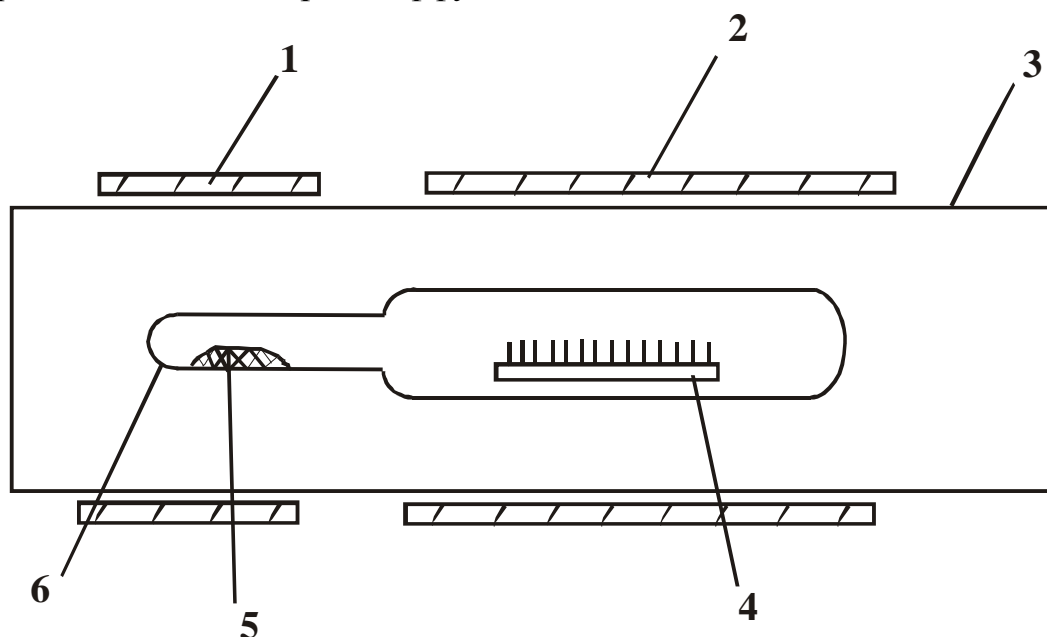


Рис. 53. Установка для диффузии в замкнутом объеме:
1, 2 – трубчатые печи; 3 – кварцевая труба; 4 – кварцевая кассета с пластинами;
5 – диффузант; 6 – кварцевая ампула

Основным недостатком такого способа является относительно высокая стоимость, ввиду того, что ампула является одноразовой и после использования разбивается. Однако при использовании высокотоксичных диффузантов, например, мышьяка, данный способ является вполне обоснованным.

5.10. Диффузия в потоке газа-носителя (диффузия по способу открытой трубы)

По этому способу пластины кремния подвергаются высокотемпературной обработке в потоке инертного газа, несущего пар примеси. При этом в качестве источников диффузантов могут использоваться твердые, жидкие и газообразные вещества. Схемы установок для диффузии в потоке газа-носителя для твердых, жидких и газообразных источников примеси представлены на рис. 54.

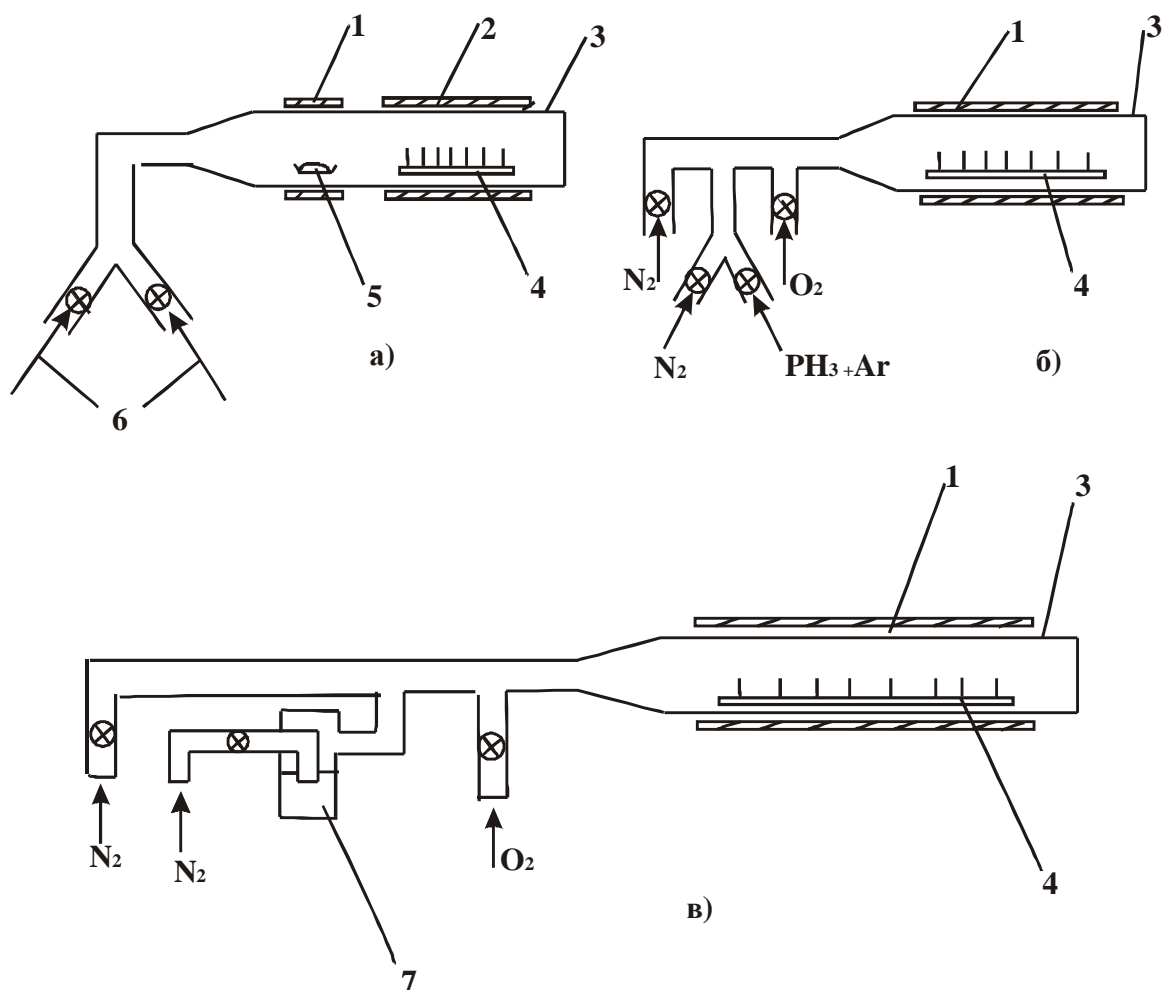


Рис. 54. Установки для диффузии в потоке газа-носителя:

а – с использованием твердого источника примеси;

б – газообразного источника примеси;

в – жидкого источника примеси:

1, 2 – трубчатые печи; 3 – кварцевая труба;

4 – кварцевая лодочка с пластинами кремния;

5 – твердый источник примеси; б – газовые потоки;

7 – сосуд с жидким источником примеси (испаритель)

При использовании твердых источников примеси установка состоит из открытой кварцевой трубы, проходящей через две трубчатые печи с независимой регулировкой температуры, обеспечивающие две зоны постоянной температуры и плавное монотонное изменение температуры от первой зоны ко второй (рис. 54,а). В одну зону помещаются пластины кремния, в другую – источник примеси. Диапазон рабочих температур составляет в зоне источника примеси 400-1000°С, в зоне диффузии – 1000-1250°С. Через трубу пропускается поток газа, основной функцией которого является перенос испаряющихся молекул источника примеси в зону диффузии. Обычно используют азот, аргон, иногда газы с примесями кислорода или водорода. В

зоне диффузии происходят химические реакции, приводящие к образованию элементарной примеси и двуокиси кремния. Продукты реакции, а также сплав SiO_2 с окислом примеси создают стеклообразные слои на поверхности кремния, которые становятся источником примеси.

Поверхностная концентрация примеси при диффузии в двухзонных печах зависит от температуры источника, его насыщенности водяными парами, состава газа-носителя, скорости и характера его потока. Присутствие воды в источнике увеличивает разброс поверхностной концентрации примеси, что является основным недостатком диффузии из твердых источников диффузантов.

В качестве газообразных источников, как было сказано ранее, используют гидриды примесей, например, фосфин (PH_3), диборан (B_2H_6), арсин (AsH_3). При диффузии из фосфина в качестве газа-носителя может использоваться смесь PH_3 , Ar и O_2 (рис. 54,б). В атмосфере реакционной камеры происходит разложение фосфина и образование фосфорного ангидрида. Преимуществом диффузии из газообразных источников является возможность достаточно просто регулировать поверхностную концентрацию примеси в широких пределах изменением содержания гидридов в инертном газе. Недостаток метода – в токсичности газообразных источников.

Диффузия из жидких источников (рис. 54,в) имеет преимущества перед диффузией из твердых источников, так как установка имеет только одну высокотемпературную зону. Для испарения жидкого источника примеси достаточно поддерживать его температуру в интервале $20-40^\circ\text{C}$. В кварцевую трубу направляются три потока газа: основной поток азота (или аргона), слабый поток такого же газа, предварительно прошедший через жидкий источник примеси, и слабый поток кислорода. Кислород необходим для образования окислов примеси. Недостатком диффузии из жидких источников является то, что и сами источники, и продукты реакций являются токсичными веществами.

В связи с переходом технологии изготовления интегральных микросхем на подложки диаметром 300 мм и более из-за нарушения газодинамики между пластинами усилился разброс электрофизических параметров легированных слоев по диаметру пластин, что привело к снижению процента выхода годных микросхем. Для устранения этого эффекта в настоящее время разработаны процессы диффузии бора и фосфора с использованием твердых планарных (поверхностных) источников. Схема установки показана на рис. 55. Благодаря тому, что полупроводниковые пластины помещаются между источниками диффузанта, удалось значительно снизить разброс поверхностного сопротивления и глубину залегания *p-n* переходов.

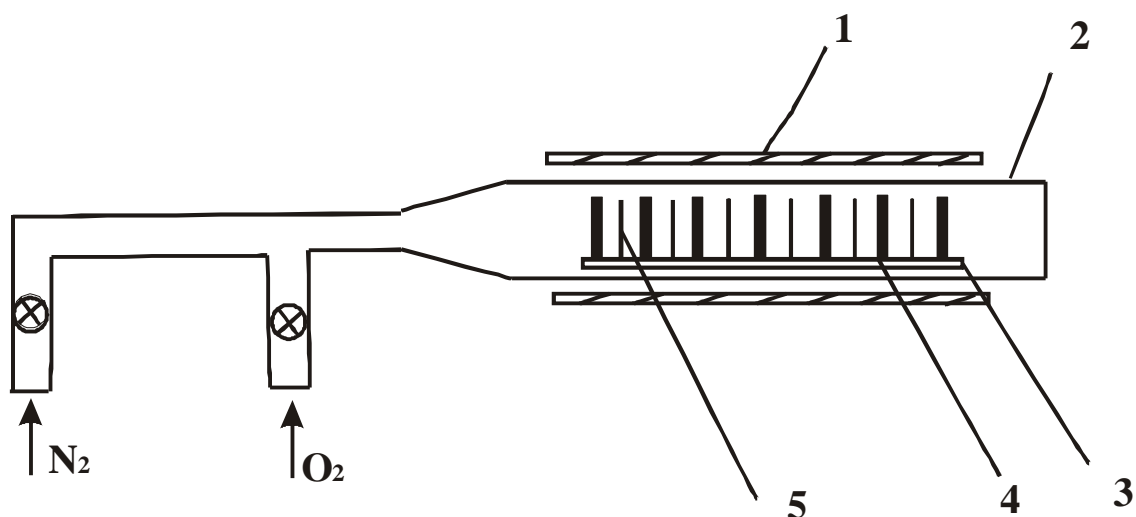


Рис. 55. Установка для диффузии из планарного источника примеси:
 1 – трубчатая печь; 2 – кварцевая труба; 3 – кварцевая лодочка; 4 – пористая кварцевая пластина, насыщенная бором или фосфором; 5 – полупроводниковая пластина

5.11. Физико-химическая сущность диффузионных процессов

В общем, различают *тотальную диффузию*, когда примесь вводится по всей поверхности полупроводниковой пластины, и *локальную диффузию*, отличающуюся тем, что диффузия проводится в окна маски из SiO_2 или Si_3N_4 строго в определенные места полупроводниковой пластины, задаваемые конструкцией (топологией) маски. Тотальной диффузией в настоящее время пользуются достаточно редко, так как эти же задачи можно решить при использовании эпитаксиального наращивания полупроводника на поверхности полупроводниковой пластины (автоэпитаксиальный процесс). Напротив, локальная диффузия – это основной технологический процесс планарной технологии.

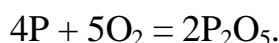
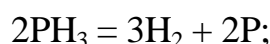
Отметим, что ионная имплантация также позволяет создавать локальные участки в приповерхностном слое полупроводниковой пластины с измененными электрофизическими характеристиками, вследствие чего она часто заменяет процесс высокотемпературной диффузии в общем цикле производства изделий электроники и наноэлектроники. Однако следует помнить, что в результате высокотемпературной диффузии велика вероятность дополнительной разгонки ранее внедренной примеси, что может приводить к закорачиванию некоторых *p-n* переходов или существенному ухудшению характеристик готового изделия. Поэтому при проектировании технологических процессов в технологии производства больших и сверхбольших интегральных микросхем (БИС и СБИС) диффузию используют преимущественно на начальных стадиях технологического процесса.

Диффузию, как и любой технологический процесс планарной технологии,

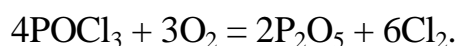
следует рассматривать как последовательность гетерогенных стадий. Стадия, характеризующаяся самой медленной скоростью, называется *лимитирующей*.

Применительно к высокотемпературной диффузии обычно выделяют следующие стадии:

- конвекционный перенос химических соединений, являющихся источником примеси, в высокотемпературную зону реактора;
- ряд объемных химических процессов, приводящих к образованию в высокотемпературной зоне реактора окислов легирующей примеси. На примере фосфина это следующие процессы:

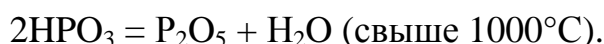
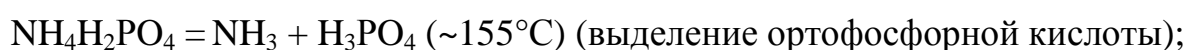
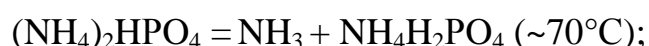
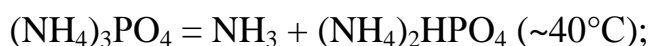


Для жидкого оксихлорида фосфора, в частности, можно записать:

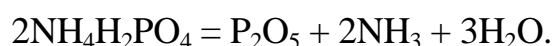


Следовательно, процесс диффузионного внедрения примеси почти всегда проводят в окислительной среде (в присутствии кислорода).

Также при обсуждении вопросов формирования источника легирующей примеси будут полезны следующие процессы:



В конечном итоге для дигидрофосфата аммония можно записать:

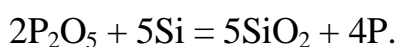


Примечание: фосфорная кислота при нагревании теряет воду с образованием, в начале, пирофосфорной, а затем метафосфорной кислот:



Дальнейший нагрев приводит к образованию фосфолеума – жидкого фосфорного ангидрида (P_2O_5) и так называемой суперфосфорной кислоты, или как ее еще называют полифосфорной кислоты. Сама полифосфорная кислота представляет собой смесь пиррофосфорной и метафосфорной кислот;

- адсорбция окислов лигатуры на поверхности полупроводника с одновременным уносом продуктов объемных процессов с основным потоком газа в реакторе;
- образование на поверхности полупроводника примесно-силикатного стекла (загонка примеси) и формирование поверхностного источника примеси. На примере диффузии фосфора на поверхности полупроводника будет протекать следующий химический процесс:



Выделяющийся на поверхности кремниевой пластины элементарный фосфор легирует полупроводник;

- диффузионное внедрение примеси в объем полупроводниковой пластины (разгонка примеси).

Конструкции реакторов, показанные на рис. 54 и 55, должны обеспечивать оптимальный температурный профиль процесса (строго определенный временной нагрев и остывание реактора, и поддержание температуры в каждой зоне на определенном уровне). В противном случае велика вероятность образования дефектов на поверхности обрабатываемых пластин.

5.12. Ионное внедрение примеси в полупроводник

При ионном внедрении (имплантации, легировании) заряженные частицы управляемого потока вещества, бомбардируя твердое тело, внедряются в него, изменяя его электрофизические, оптические и другие свойства. В отличие от диффузии ионное внедрение обеспечивает контролируемое (от 10^{11} до 10^{16} ион/см²) введение легирующих атомов в полупроводниковые подложки, что является его основным достоинством.

Кроме того, к достоинствам ионного внедрения относят:

- его полную совместимость с процессами планарной технологии;
- однородность легирования, обусловленную электростатическим, механическим и комбинированным сканированием ионного пучка;
- особо чистые условия процесса, исключая загрязнение подложек посторонними примесями.

Наиболее существенным недостатком ионного внедрения является

нарушение кристаллической структуры кремния и диоксида кремния – появление дефектов в результате первичных или вторичных соударений внедряемых ионов с атомами обрабатываемого материала. Для устранения образовавшихся нарушений, а также стабилизации свойств легированных слоев и активации примеси имплантированные подложки отжигают при низкой (400-600°C) или высокой (900-1000°C) температуре. При термической обработке выше 1000°C одновременно с отжигом происходит разгонка имплантированных атомов примеси.

При низкотемпературном отжиге сохраняются значительные нарушения, но их миграция невелика. Так как ближе к поверхности подложек находится наибольшее количество именно радиационных дефектов, а не примесных (легирующих) атомов, то их влияние на электронно-дырочный переход незначительно. При низкотемпературном отжиге устраняются в основном нарушения вблизи *p-n* перехода, что обеспечивает его высокое качество. Низкотемпературный отжиг применяют также в тех случаях, когда слои металлизации, а также элементы полупроводниковых приборов и ИМС не выдерживают высоких температур.

При высокотемпературном отжиге большая часть нарушений восстанавливается, но все же оставшаяся часть оказывается велика, и эти дефекты следует учитывать при создании приборов и ИМС. Так при температуре выше 1000°C одновременно с разгонкой имплантированных атомов примеси иногда увеличивается распространение дефектов за пределы имплантированной области. Это означает, что даже высокотемпературный отжиг не гарантирует устранение нарушений кристаллической решетки.

При ионной обработке МОП-структур на границе раздела кремний-диоксид кремния образуется фиксированный положительный заряд, и возникают быстрые поверхностные состояния. С увеличением дозы имплантации эти явления усиливаются, а затем происходит насыщение. Фиксированный положительный заряд устраняют отжигом подложек при температуре до 500°C с одновременной обработкой ультрафиолетовым излучением. Быстрые поверхностные состояния снимаются обработкой подложек в атмосфере азота при температуре 400-500°C.

Ионную имплантацию применяют в технологии изготовления биполярных и униполярных транзисторов в основном на тех стадиях технологического процесса, когда использование высокотемпературной диффузии становится критичным из-за дополнительной разгонки ранее внедренной примеси. Кроме того, точное управление концентрацией и толщиной *p*- и *n*-слоев биполярных структур позволяет создавать малошумящие и мощные транзисторы с высокими и воспроизводимыми параметрами. Такая технология полностью применима в производстве БИС и СБИС. В настоящее время ионная имплантация является одним из основных технологических процессов изготовления полупроводниковых приборов и ИМС. Причем в производстве СБИС отдельных типов количество операций ионной

имплантации может достигать 8-11.

Достоинства ионной имплантации:

1. Возможность вводить (имплантировать) любую примесь, практически любой элемент периодической таблицы Менделеева. Однако на практике возможность вводить любую примесь иногда ограничена свойствами рабочего вещества ионного источника или режимами работы самого ионного источника, например, слишком высокая рабочая температура, химическая или температурная нестойкость, чрезмерная токсичность, коррозионная активность.
2. Возможность легировать любой материал. В действительности это означает не только возможность внедрить атомы легирующего вещества внутрь объема мишени. В общем, понятие «легирование» означает еще и вполне определенное положение примеси в кристаллической решетке мишени. Это означает, что возможности ионной имплантации во многих случаях не намного больше, чем, например, диффузии. Так при помощи ионной имплантации возможно получить глубинное залегание легирующей примеси или, изменяя энергию ионного пучка, получить ступенчатое распределение примеси.
3. Возможность вводить примесь в любой концентрации независимо от ее растворимости в материале подложки. Однако на практике оказывается, что возможность вводить примесь в любой концентрации ограничена сверху коэффициентом распыления слоя. Кроме того, примесь, введенная сверх предела растворимости, при отжиге дефектов, как правило, выделяется в виде преципитатов другой фазы.
4. Возможность вводить примесь в широком диапазоне температур. Однако на практике низкие температуры легирования характерны только для таких систем, где состояние кристаллической решетки несущественно. Если же нарушенную решетку нужно восстановить после имплантации, то выигрыш в температуре по сравнению, например, с диффузионным легированием становится существенно скромнее.
5. Возможность работать с легирующими веществами высокой степени чистоты. Действительно, технологическая чистота легирующих веществ достигается средствами предварительного сепарирования внедряемого в подложку пучка ионов. Современные средства сепарации и разделения пучков ионов позволяют выделять отдельные изотопы химических элементов, то есть возникает возможность легировать не только данным элементом, но и исключительно данным изотопом этого элемента.

6. Легкость локального легирования. Локальное легирование достигается либо за счет использования маскирования, либо за счет имплантации узкосфокусированным ионным пучком. Возможна также имплантация сфокусированным ионным пучком высокой мощности непосредственно через слой диэлектрика (в формировании окон потребность отпадает). Однако при использовании контактных трафаретов-масок возникает вероятность «вбивания» материала маски в легированный слой.
7. Возможность формирования малых толщин легированного слоя (менее микрона). Применительно к микроэлектронике это очень существенное преимущество.
8. Возможность получения больших градиентов концентрации примеси по глубине слоя, недостижимые при традиционных методах с неизбежным диффузионным размыванием границы. Тем не менее расчетные градиенты (по распределению пробегов ионов) реально никогда не получаются из-за размытия профиля, обусловленного радиационным стимулированием диффузии примеси.
9. Легкость контроля и полная автоматизация технологического процесса. Важно также помнить, что в настоящее время ионная имплантация – это один из самых дорогостоящих технологических процессов, однако он совместим с планарной технологией, имеет ряд достоинств и поэтому широко применяется в современной микроэлектронике.

Итак, ионная имплантация с сепарацией по массам – уникальный по своим возможностям метод модификации поверхностных слоев по набору легирующих примесей, типам обрабатываемых материалов и диапазону концентраций примеси в легированном слое.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Тема. Высокотемпературная диффузия примеси в полупроводник

Цель работы

1. Изучить основы теории процессов диффузии примесей в полупроводник.
2. Освоить технологический процесс диффузии примесей в кремний.
3. Отработать методики определения величин поверхностного и удельного объемного сопротивлений полупроводника, поверхностной концентрации примеси в полупроводнике и глубины залегания p - n перехода.

Применяемые материалы

1. Перекись водорода.
2. Кислота серная.
3. Кислота азотная.
4. Кислота ортофосфорная.
5. Кислота плавиковая.
6. Гидроксид аммония.
7. Вода дистиллированная (бидистиллят).
8. Ацетон.
9. Бумага фильтровальная.
10. Вата медицинская гигроскопическая.
11. Паста шлифовальная на основе корундовой керамики (зерно не более 100 мкм).
12. Спиртовой раствор дигидрофосфата аммония.
13. Спиртовой раствор борной кислоты.
14. Пленкообразующий состав с источником примеси *n*- и *p*-типов на основе тетраэтоксисилана (этил-силиката).
15. Пластины кремниевые *n*- или *p*-типа.

Оборудование, инструменты, приспособления и контрольно-измерительная аппаратура

1. Пинцет медицинский хирургический.
2. Контейнер керамический.
3. Чашка керамическая.
4. Стакан из огнеупорного стекла.
5. Кварцевая лодочка.
6. Электроплитка с водяной баней.
7. Микроскоп.
8. Микрометр.
9. Палочка фторопластовая.
10. Портативная центрифуга.
11. Сушильный шкаф.
12. Муфельная печь, выполняющая роль диффузионного реактора (рис. 56).
13. Установка для изготовления сферического шар-шлифа (рис. 57).
14. Установка для измерения параметров полупроводниковых материалов 4-х зондовым методом (рис. 58).

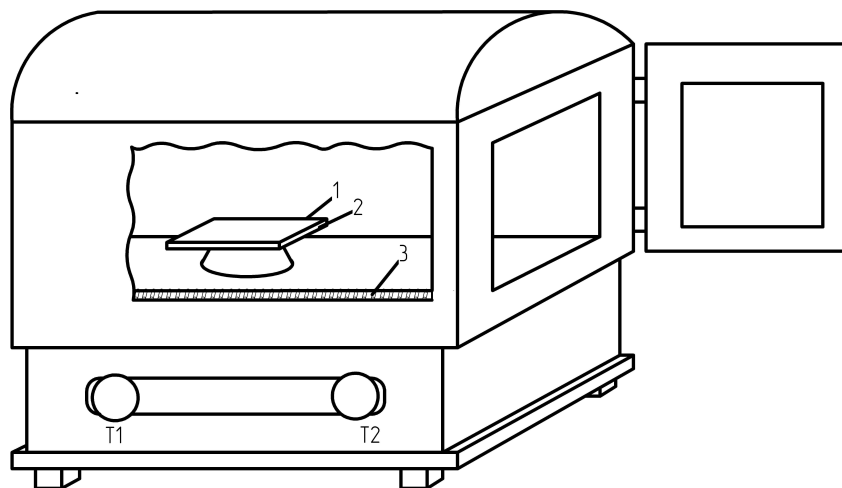


Рис. 56. Муфельная печь, выполняющая роль диффузионного реактора:
 1 – полупроводниковая пластина; 2 – керамический столик; 3 – резистивный нагреватель печи; T1 и T2 – положения переключателя диапазона нагрева печи

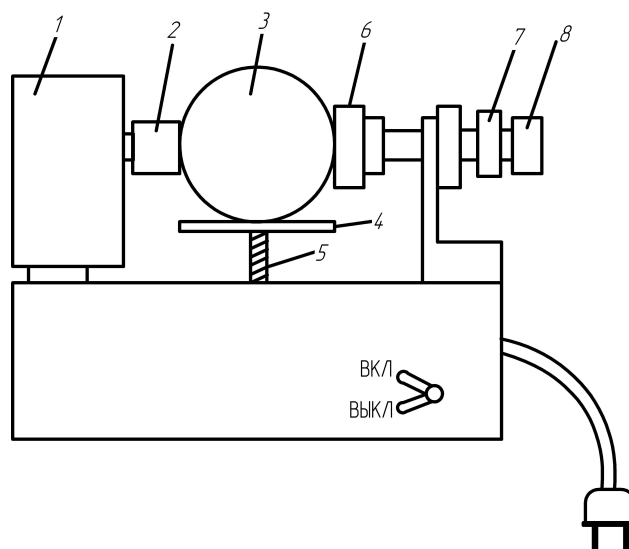


Рис. 57. Установка для изготовления сферического шар-шлифа:
 1 – шаговый электродвигатель с приводом; 2 и 6 – боковые зажимы шар-шлифа; 3 – шар-шлиф диаметром 44,5 мм; 4 – столик для полупроводниковой пластины; 5 – прижимной механизм столика для полупроводниковой пластины; 7 – контргайка; 8 – прижимной механизм шар-шлифа

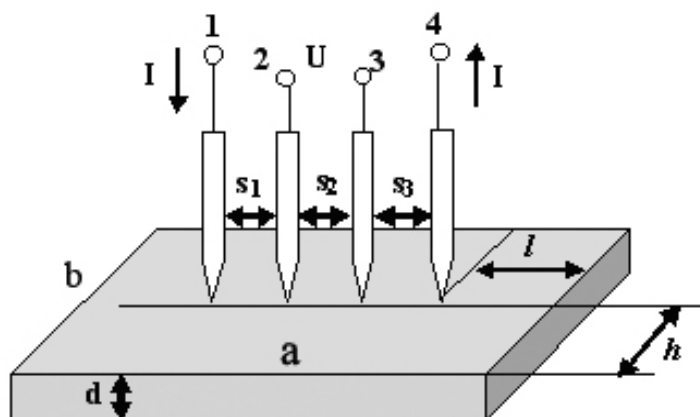


Рис. 58. Установка для измерения параметров полупроводниковых материалов 4-х зондовым методом:

1 и 4 – токовые зонды; 2 и 3 – потенциальные зонды; $s_1=s_2=s_3=s$ – расстояние между зондами; a и b – габаритные размеры полупроводниковой пластины; d – толщина пластины

Задание и ход выполнения работы

Домашняя работа:

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить необходимые экземпляры таблиц для занесения результатов лабораторных испытаний.
3. Изучить теоретические сведения.
4. Подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

Последовательность работы в лаборатории

1. Определить удельное сопротивление полупроводниковой пластины.
2. Провести процесс диффузии примеси в кремниевую пластину (бора либо фосфора в зависимости от типа проводимости образца).
3. Определить поверхностное сопротивление кремниевой пластины после внедрения примеси.
4. Определить удельное сопротивление диффузионного слоя, полученного в результате проведения технологического процесса диффузии.
5. Определить глубину залегания p - n перехода.
6. Определить поверхностную концентрацию примеси после проведения диффузионного процесса.

Порядок выполнения работы

1. Определить удельное сопротивление полупроводниковой пластины

- 1.1. Получите у лаборанта образец полупроводниковой пластины *n*- или *p*- типа проводимости.
- 1.2. Произведите комплексную очистку поверхности пластины, используя методику, приведенную в табл. 18.

Внимание: в процессе очистки пластины все манипуляции с ней производить с использованием пинцета. Трогать пластину руками нельзя. После каждого этапа очистки пластину подсушить при помощи фильтровальной бумаги и окончательно просушить в сушильном шкафу. Время сушки 10 мин при температуре 80-100°C. Наличие на поверхности пластины разводов говорит о не надлежащем качестве ее промывки в дистиллированной воде. В конце после всех этапов очистки пластину протереть ацетоном при помощи ватного тампона.

Таблица 18

Последовательность преддиффузионной очистки поверхности полупроводниковой пластины

Номер этапа	Последовательность действий и используемые реактивы
1 этап	Поместить пластину кремния на 15 мин в раствор $H_2O_2 : H_2SO_4 (1:1)$.
	Промыть пластину в дистиллированной воде.
	Освежить пластину в растворе плавиковой кислоты HF (10%) в течение 15 с.
	Промыть пластину в дистиллированной воде.
2 этап	Поместить пластину в раствор $H_2O_2 : NH_4OH (10:3)$ и прокипятить 15 мин на водяной бане.
	Промыть пластину в дистиллированной воде.
	Освежить пластину в растворе плавиковой кислоты HF (10%) в течение 15 с.
	Промыть пластину в дистиллированной воде.
3 этап	Поместить пластину в раствор $H_2O_2 : HCl (10:3)$ и прокипятить 15 мин на водяной бане.
	Промыть пластину в дистиллированной воде.
	Освежить пластину в растворе плавиковой кислоты HF (10%) в течение 15 с.
	Промыть пластину в дистиллированной воде.
4 этап-12 этап	Повторить этапы 1-3 еще 3 раза.

После окончания очистки пластины и протирки ее ацетоном поверхность пластины должна иметь металлический блеск, быть зеркальной и не иметь даже незначительных разводов. Только в этом случае можно будет переходить к этапу формирования источника примеси.

- 1.3. Определите величину удельного объемного сопротивления ρ_n только что очищенной пластины с использованием 4-х зондовой установки (рис. 58). Результаты измерений напряжений на потенциальных зондах, тока, протекающего через токовые зонды и толщины полупроводниковой пластины, а также ρ_n занести в табл. 19. Повторите измерения величины напряжения несколько раз до четкого экспериментального фиксирования среднего значения по результатам нескольких измерений.

Таблица 19

Свод полученных экспериментальных величин

Номер п/п	d, m	I, A	U, B	ρ_n (Ом·см); $R^{нов}$ (Ом); ρ_k (Ом·см); h_{p-n} (мкм); $N^{нов}$ (см ⁻³)	Пояснения, относительно этапов выполнения работ
1					Определение ρ_n после многостадийной очистки пластины
2					
...					
Усредненная величина					
...					Определение $R^{нов}$ после формирования диффузионной области
Усредненная величина					
					Определение ρ_k
					Определение h_{p-n}
					Определение $N^{нов}$

Примечание:

ρ_n – удельное сопротивление полупроводниковой пластины до формирования диффузионной области;

$R^{нов}$ – поверхностное сопротивление полупроводниковой пластины после формирования диффузионной области;

ρ_k – удельное сопротивление диффузионного слоя, полученного в результате проведения технологического процесса (измеренная

величина ρ_k будет относиться только к части полупроводниковой пластины до p - n перехода);

h_{p-n} – глубина залегания p - n перехода;

N^{nos} – поверхностная концентрация примеси после ее разгонки (проведения диффузионного процесса).

Будьте внимательны, не допускайте царапание пластины острием зондов. Старайтесь размещать зонды в центре полупроводниковой пластины, это позволит снизить погрешность измерений за счет влияния краевых эффектов. Расчет ρ_n выполнить по

формуле: $\rho_n = \frac{\pi d}{\ln 2} \cdot \frac{U}{I} \cdot \frac{1}{F_l}$, где F_l – поправочный коэффициент,

учитывающий влияние краевых эффектов из-за неоптимального расположения зондов по отношению к торцам полупроводниковой пластины (обозначения см. на рис. 58). Будем считать, что торцы пластины непроводящие, то есть пассивированные естественным слоем диэлектрика. Значения коэффициентов F_l указаны в табл. 20.

Таблица 20

Поправочные коэффициенты F_l для линейного расположения зондов и непроводящих торцов полупроводниковой пластины

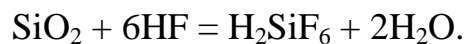
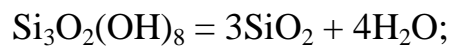
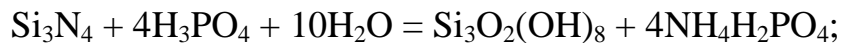
$l/s, h/s$	$F_{l_1} (l/s)$	$F_{l_2} (h/s)$
0	0,69	0,5
0,2	0,79	0,533
0,5	0,882	0,658
1,0	0,947	0,842
2,0	0,992	0,965
5,0	0,996	0,997
10,0	0,9995	0,9996

Примечание к табл. 20.

В каждом конкретном случае необходимо использовать одно из отношений l/s или h/s в зависимости от того, к каким торцам полупроводниковой пластины наиболее близко располагаются зонды и, соответственно, брать один из поправочных коэффициентов $F_{l_1} (l/s)$ или $F_{l_2} (h/s)$. Обозначения см. на рис. 58.

Если величина сопротивления окажется нестабильной, или источник питания будет периодически переключаться в режим стабилизации напряжения, то, скорее всего, на поверхности

полупроводниковой пластины в качестве пассивирующего слоя был использован нитрид кремния или толстый слой SiO_2 в виде примесно-силикатного стекла. В этом случае необходимо осуществить дополнительную очистку поверхности пластины путем ее кипячения в течение 30 мин в горячей смеси концентрированных HF и H_3PO_4 (1:1). При этом будут протекать следующие процессы:



2. Провести процесс диффузии примеси в кремниевую пластину (бора либо фосфора в зависимости от типа проводимости образца)

Сформируйте на поверхности полупроводниковой пластины тонкий слой источника примеси. Возможно несколько вариантов формирования этого слоя. Выполняется один или несколько вариантов в зависимости от задания, выданного преподавателем.

Формирование поверхностного источника примеси на основе не остеклованного фосфоро-силикатного стекла и борной кислоты

Если исходная полупроводниковая пластина имела дырочный тип проводимости, то формирование поверхностного источника следует выполнять на основе примеси *n*-типа. В этом случае пластину кипятят на водяной бане в смеси концентрированных кислот HNO_3 и H_3PO_4 (1:1) в течение 2 часов. Основным процессом здесь будет являться окисление поверхности кремния с образованием SiO_2 :



Фосфорная кислота будет легировать образующееся на поверхности стекло, насыщая его эквивалентным количеством фосфора.

Если исходная полупроводниковая пластина имела электронный тип проводимости, то формирование поверхностного источника следует выполнять на основе примеси *p*-типа. В этом случае на поверхность пластины методом центрифугирования наносится спиртовой раствор борной кислоты. После испарения спирта на поверхности формируется тонкая пленка ортоборной кислоты (при последующих термических обработках H_3BO_3 легко разлагается с выделением B_2O_3).

Формирование поверхностного источника примеси на основе вспомогательных пленкообразующих веществ (ТЭОС – тетраэтоксисилана или этилсиликата)

Если исходная полупроводниковая пластина имела дырочный тип проводимости, то формирование поверхностного источника следует выполнять на основе пленкообразующего состава, содержащего примеси *n*-типа. В этом случае следует использовать пленкообразующий состав $xP_2O_5 + ySiO_2$, где *x* и *y* – эквивалентные массовые доли каждого из этих веществ, получаемые после отжига поверхностного источника примеси.

Если исходная полупроводниковая пластина имела электронный тип проводимости, то формирование поверхностного источника следует выполнять на основе пленкообразующего состава, содержащего примеси *p*-типа. В этом случае следует использовать пленкообразующий состав $xB_2O_3 + ySiO_2$, где *x* и *y* – эквивалентные массовые доли каждого из этих веществ, получаемые после отжига поверхностного источника примеси.

Пленкообразующие составы готовятся лаборантом отдельно от проведения лабораторного практикума и используются обучающимися, как готовый раствор.

Пленкообразующие составы наносятся на предварительно очищенную пластину методом центрифугирования, придерживаясь следующей методики:

1. Закрепите полупроводниковую пластину на столике центрифуги.
2. Подготовьте пленкообразующий раствор и пипетку, посредством которой будет капельно наноситься раствор на центральную часть полупроводниковой пластины.
3. Включите центрифугу и дождитесь набора номинальной частоты ее вращения.
4. Осторожно по одной капле наносите пленкообразующий раствор на поверхность вращающейся пластины. Всего следует наносить не более 4 капель с периодичностью 20-30 с. В процессе нанесения следите за тем, чтобы капли раствора равномерно распределялись по поверхности пластины. В случае образования участков непокрытия на пластине операцию нанесения раствора повторить после промывки и сушки полупроводниковой пластины. Окончательная сушка поверхностного слоя примеси осуществляется на той же самой центрифуге в течение 5 мин.

Формирование поверхностного источника примеси на основе спиртовых растворов твердых источников примеси

Если исходная полупроводниковая пластина имела дырочный тип проводимости, то формирование поверхностного источника следует выполнять с использованием спиртового раствора H_3BO_3 , если электронный, то с использованием спиртового раствора $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Технология нанесения такая же, как и в предыдущем случае – с использованием центрифуги. Единственное отличие заключается в том, что ввиду отсутствия пленкообразующего компонента, предъявляются более жесткие требования к операциям сушки – не допускается кристаллизация вещества на поверхности полупроводниковой пластины. Количество наносимого раствора на пластину должно быть оптимальным, с одной стороны, обеспечивающим равномерное покрытие поверхности, а с другой стороны – отсутствие образования на поверхности кристаллической формы вещества. Именно поэтому весь процесс сушки должен происходить на центрифуге. Сушка в сушильном шкафу запрещается.

Проведение процесса диффузионного внедрения примеси

После формирования на полупроводниковой пластине поверхностного источника она помещается в муфельную печь (рис. 56) на заданное преподавателем время для осуществления операции диффузионного внедрения примеси. Температурный режим работы печи обеспечивает равномерный разогрев рабочей камеры в течение 1 часа и поддержание температуры на уровне $1000\text{-}1100^\circ\text{C}$ при включенном питании 220 В и закрытой передней дверцей. Время диффузионного внедрения (задается преподавателем) отсчитывается ровно через 1 час с момента загрузки пластины в печь, плотного закрытия передней дверцы и включения печи в электрическую сеть 220 В. По истечении заданного времени диффузионного внедрения примеси в полупроводник печь отключается от электросети, а передняя дверца приоткрывается примерно на треть. Полностью остывшая полупроводниковая пластина перед проведением любых последующих измерений должна быть освежена в течение 2 мин в HF (10%).

Процессы, протекающие в диффузионной печи с момента ее включения (разогрева) и до момента ее выключения и остывания

Временной профиль изменения температуры в рабочей камере печи показан на рис. 59, соответственно высокотемпературный режим (режим T_2) и низкотемпературный режим (режим T_1).

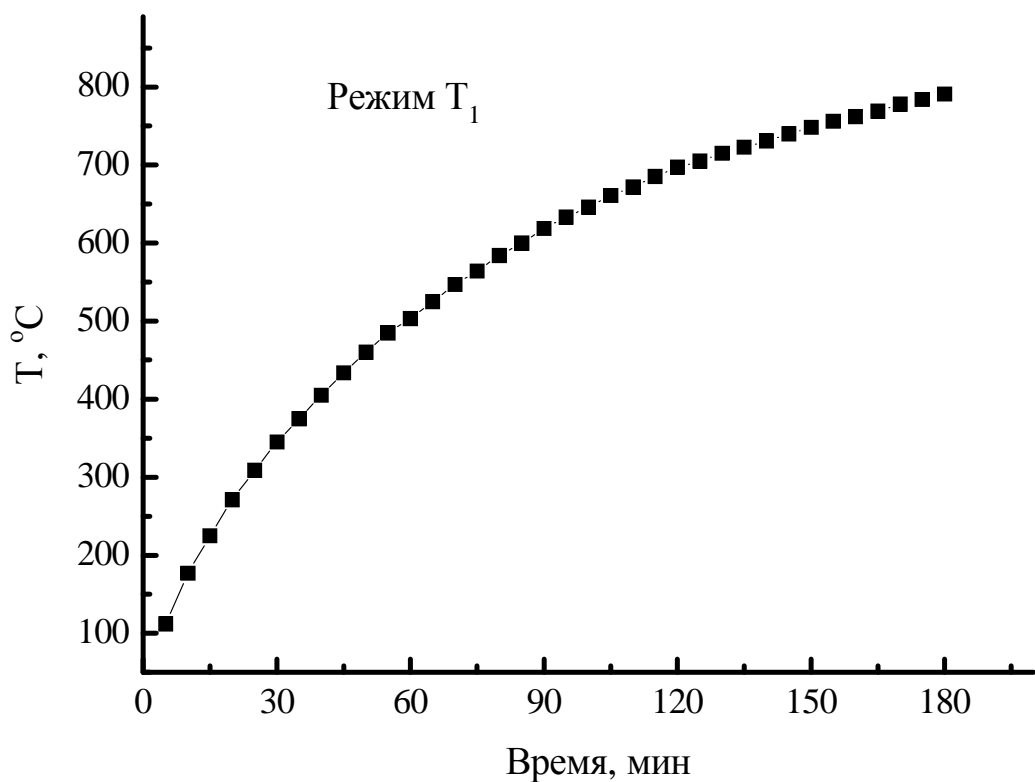
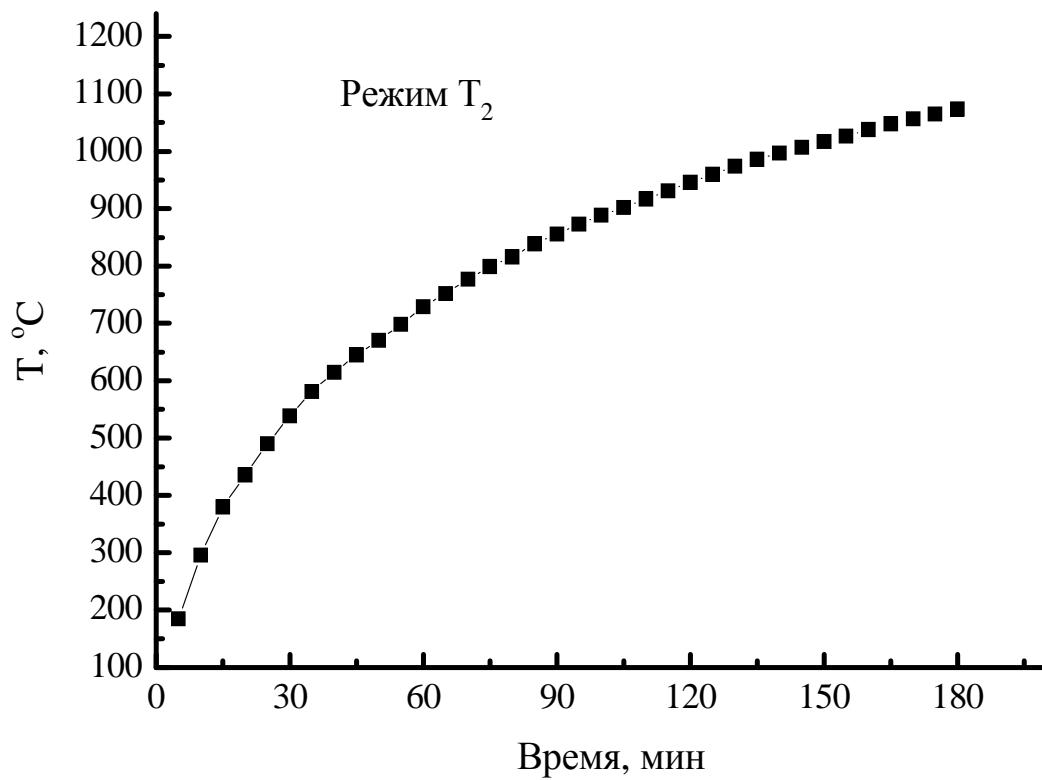


Рис. 59. Временной профиль изменения температуры в рабочей камере печи при ее разогреве (режимы T_2 и T_1)

На участке прогрева печи до выхода температуры на рабочий режим разгонки примеси происходит формирование поверхностного источника примеси (ее загонка) с образованием на поверхности полупроводниковой пластины примесно-силикатного стекла. В зависимости от предварительно нанесенного вещества, являющегося источником легирующей примеси, на поверхности пластины могут протекать различные процессы, рассмотренные ранее. Но в любом случае конечным веществом разложения источников лигатуры будет либо фосфоросиликатное стекло, либо боросиликатное стекло. Стекло в дальнейшем будет предотвращать испарение легирующей примеси и образование температурных дефектов на поверхности кремния, а элементарные фосфор и бор будут легировать полупроводник. При достижении температуры 1000-1100°С начинается второй этап диффузии – разгонка примеси. По окончании процесса загонки примеси печь выключается, передняя дверца открывается примерно на треть и печь остывает естественным образом. После полного остывания печи пластина извлекается из рабочей зоны и подвергается анализу.

3. Определить поверхностное сопротивление кремниевой пластины после внедрения примеси

Для образцов различной формы (в виде прямоугольника или квадрата) необходимо будет выбирать поправочный коэффициент из табл. 21. Если диффузионный слой имеется только с одной стороны пластины и его можно рассматривать в определенном приближении как слой бесконечно малой толщины и неограниченных размеров, то падение напряжения между потенциальными (средними из четырех) зондами (см. рис. 58) будет:

$$R^{нов} = C \frac{U}{I}, \text{ где}$$

$R^{нов}$ – поверхностное сопротивление полупроводниковой пластины;

C – численный коэффициент, определяемый из табл. 21, являющийся результатом учета поправочных функций;

U – разность потенциалов между внутренними (потенциальными) зондами;

I – ток, протекающий в цепи токовых зондов.

Значения коэффициента C для различной геометрии пластины при диффузии по всей поверхности образца

b/s	$a/b=1$	$a/b=2$	$a/b=3$	$a/b=4$
1,0			0,998	0,994
1,25			1,1267	1,2248
1,5		1,4788	1,4893	1,4893
1,75		1,7196	1,7238	1,7238
2,0		1,9454	1,9475	1,9475
2,5		2,3532	2,3541	2,5341
3,0	2,4575	2,7000	2,7005	2,7005
4,0	3,1137	3,2246	3,2248	3,2248
5,0	3,5098	3,5749	3,5750	3,5750
7,5	4,0095	4,0361	4,0362	4,0362
10,0	4,2209	4,2357	4,2357	4,2357
15,0	4,3882	4,3947	4,3947	4,3947
20,0	4,4516	4,4553	4,4553	4,4553
40,0	4,5120	4,5129	4,5129	4,5129

Результат расчета $R^{нов}$ занести в табл. 19.

4. Определить удельное сопротивление диффузионного слоя, полученного в результате проведения технологического процесса диффузии

При наличии в объеме пластины высоколегированной диффузионной области величина объемного удельного сопротивления этого слоя ρ_k будет зависеть от толщины этого слоя и $R^{нов}$. Если предположить однородность свойств диффузионного слоя по толщине, то:

$$\rho_k = R^{нов} \cdot h_{p-n}, \text{ где}$$

h_{p-n} – глубина залегания $p-n$ перехода (определяется при помощи методики декорирования шлифа).

Результат расчета ρ_k занести в табл. 19.

5. Определить глубину залегания *p-n* перехода

Для этих целей на поверхности полупроводниковой пластины с диффузионной областью необходимо изготовить сферический шлиф на установке, показанной на рис. 57.

Порядок изготовления сферического шлифа на поверхности полупроводниковой пластины

- 5.1. Ослабив винт 7, выкрутить прижимной механизм 7 так, чтобы шар-шлиф 3 можно было без усилий снять с установки.
- 5.2. Протереть шар-шлиф и столик 4 ацетоном до полного удаления с них остатков шлифовальной пасты.
- 5.3. Поместить в направляющие столика 4 исследуемую полупроводниковую пластину, установить шар-шлиф между боковыми зажимами 2 и 6 и закрепить его на установке при помощи прижимного механизма 8, окончательно зафиксировав его контргайкой 7. После этого установка готова для изготовления шлифа на поверхности полупроводниковой пластины.
- 5.4. Осторожно опустить прижимной механизм 5 вместе со столиком 4 вниз и в месте планируемого контакта шар-шлифа с полупроводниковой пластиной стеклянной палочкой нанести каплю шлифовальной эмульсии.
- 5.5. Запустить установку, предварительно подав на нее электропитание, переведя тумблер в положение «ВКЛ». **ВНИМАНИЕ! Общее время изготовления шлифа 2 минуты.** В процессе шлифования на поверхность шара в течение первой минуты с периодичностью в 20 с наносить дополнительно по 1 капле шлифовальной эмульсии. Во время второй минуты шлифования эмульсию наносить не надо. По истечении 2 минут выключить установку, переведя тумблер в положение «ВЫКЛ», извлечь полупроводниковую пластину. При помощи ватного тампона, смоченного сначала в жирном растворителе, а затем в ацетоне, удалить остатки шлифовальной эмульсии со столика установки, с шара и с самой полупроводниковой пластины.
- 5.6. Изготовление шлифа на поверхности пластины закончено. Внешний вид шлифа на полупроводниковой пластине показан на рис. 60.

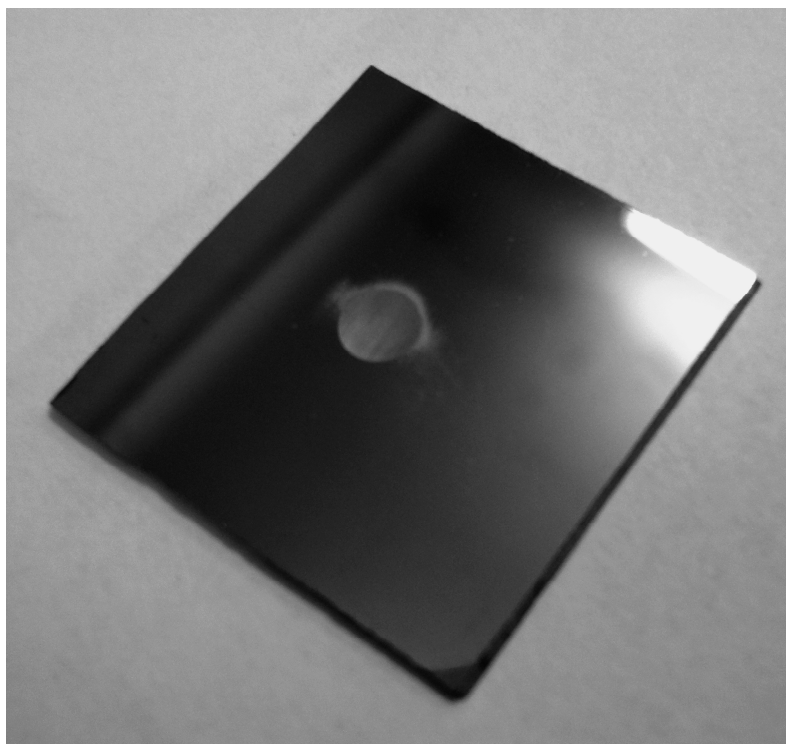


Рис. 60. Внешний вид шлифа на поверхности полупроводниковой пластины

Границу $p-n$ перехода выявляют химическим окрашиванием (химическим декорированием) n -области в водном растворе $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ (10%), в который добавляют несколько капель концентрированной HF . Легированные области кремния n -типа покрываются осаждаемой из раствора медью (появляется красный оттенок). Внешний вид декорированного медью шлифа показан на рис. 61. Погрешность этого метода составляет $\approx 10\%$ при глубинах $p-n$ переходов до нескольких десятков мкм.

При декорировании следует придерживаться следующих рекомендаций. Полученный после изготовления шлиф обезжиривается в растворителях и сушится в течение 4-5 мин естественным образом на воздухе. Раствор для декорирования наносится точно в лунку шлифа (1-2 капли) так, чтобы он не растекался по поверхности пластины. Если образовались подтеки раствора за пределами лунки, то пластина освежается в разбавленной азотной кислоте (20-30 с), промывается дистиллированной водой, протирается ацетоном, сушится и вновь подвергается процессу декорирования в растворе $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$. Время декорирования (осаждения меди на пластину) 30-40 с. Это время может быть незначительно увеличено или уменьшено в зависимости от уровня освещенности лаборатории и температуры в помещении. При неоптимальном времени осаждения меди n -область может быть

неразличима из-за осаждения меди (хоть и в меньшем объеме) на соседних областях пластины.

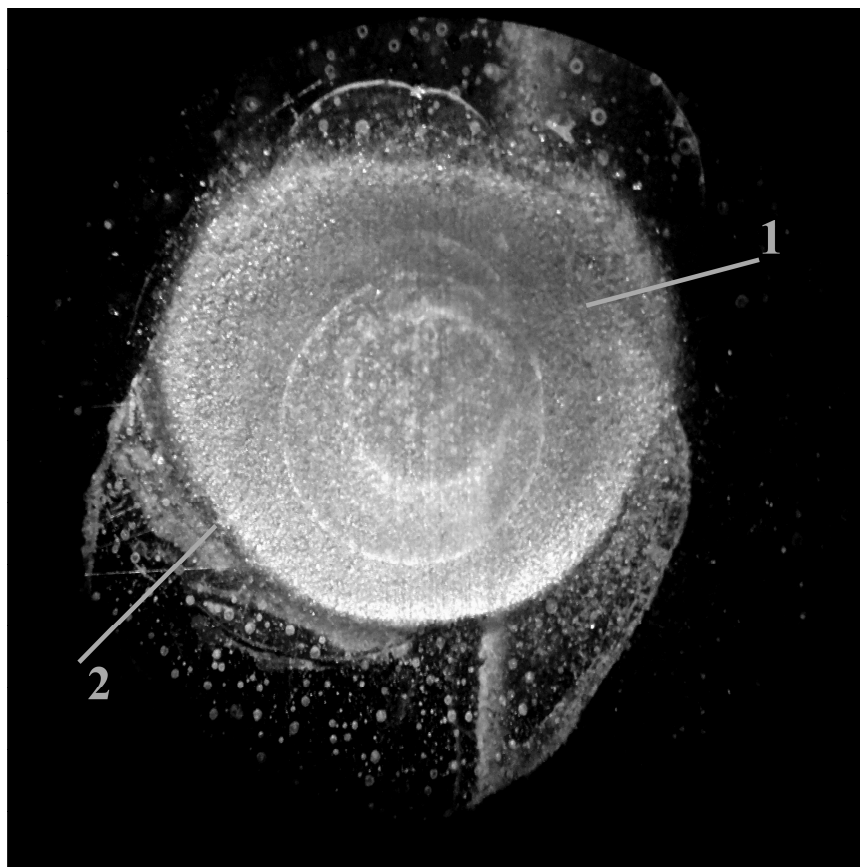


Рис. 61. Шлиф на полупроводниковой пластине кремния, декорированный медью после внедрения в пластину *p*-типа фосфора: 1 – область шлифа; 2 – область проводимости *n*-типа, покрытая слоем меди и выглядящая как окантовка шлифа

Для определения глубины залегания *p-n* перехода необходимо под микроскопом определить диаметры окружностей, которые образовались в результате декорирования (они ограничивают область *n*-типа). Условно и укрупненно данные окружности показаны на рис. 62, а их диаметры обозначены через d_1 и d_2 .

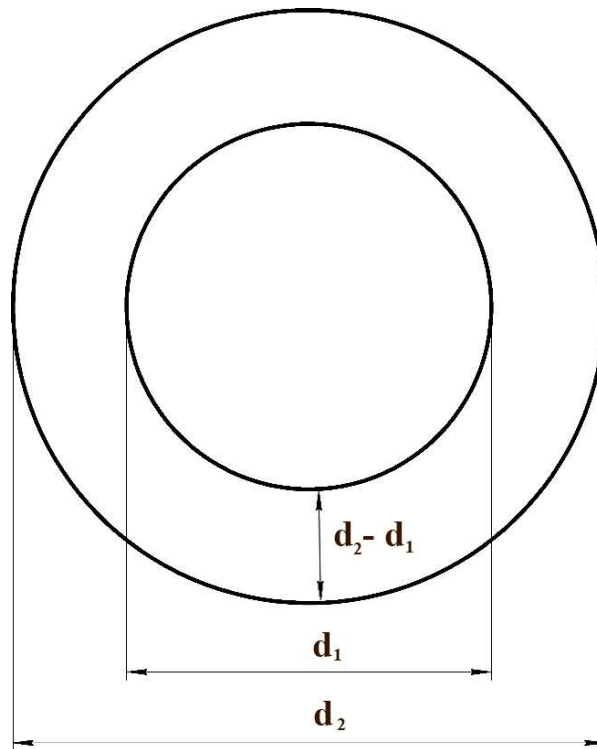


Рис. 62. Условное обозначение окружностей, ограничивающих декорированную n -область пластины, полученную при помощи диффузии

Расчет глубины залегания p - n перехода выполнить по формуле:

$$h_{p-n} = \frac{d_1 + \Delta d}{D} \cdot \Delta d, \text{ где}$$

D – диаметр шара-шлифа (44,5 мм), d_1 – диаметр меньшей окружности, мм, $\Delta d = d_2 - d_1$, d_2 – диаметр бóльшей окружности, мм.

Результат расчета глубины залегания p - n перехода, выраженный в мкм, занести в табл. 19.

6. Определить поверхностную концентрацию примеси после проведения диффузионного процесса

По результатам определения ρ_k с использованием графиков Ирвина, приведенных на рис. 63, определить поверхностную концентрацию примеси $N^{нов}$ и занести ее в табл. 19.

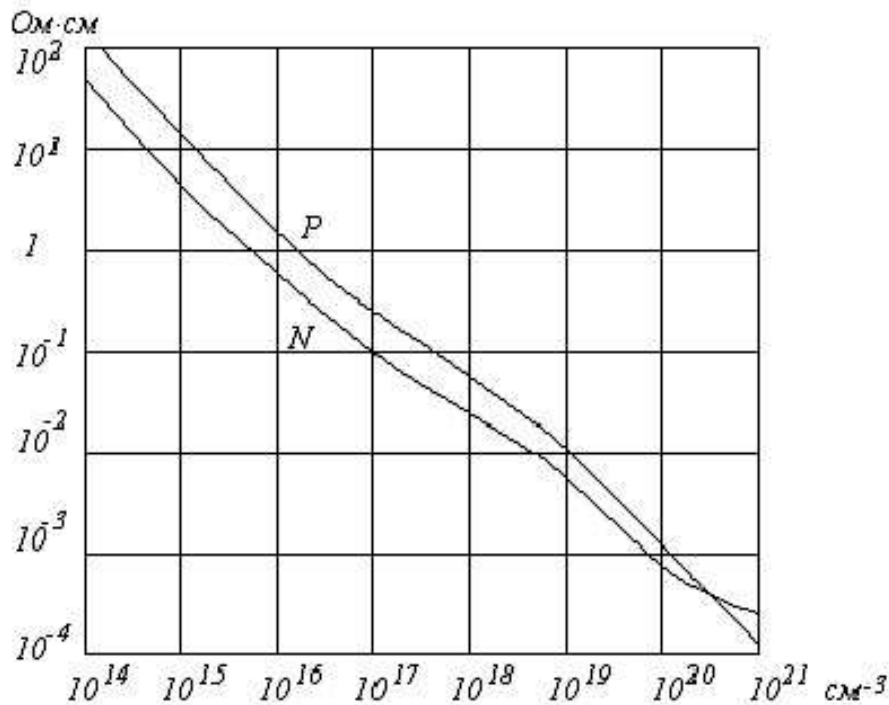


Рис. 63. График Ирвина. Зависимость удельного сопротивления от концентрации легирующей примеси для полупроводников *n*- и *p*-типа проводимости

Определяя $N^{нов}$, надо иметь в виду, что это концентрация электрически активной примеси, а не полная концентрация, так как при высоких уровнях легирования эти две концентрации могут отличаться.

Контрольные вопросы к разделу "Высокотемпературная диффузия примеси в объем полупроводниковой подложки"

1. Понятие о диффузии примесей в полупроводник как о процессе планарной технологии. Роль и место высокотемпературной диффузии в планарной технологии изготовления микросхем.
2. Что такое коэффициент диффузии?
3. Первое уравнение Фика и его физический смысл.
4. Второе уравнение Фика и его физический смысл.
5. Диффузия из бесконечного источника примеси. Математическая модель и её реальное применение.
6. Как определяется доза легирования?
7. Из каких соображений выбирается поверхностная концентрация примеси?
8. Как условно изобразить процесс образования *p-n* перехода?

9. Диффузия из конечного источника примеси. Математическая модель и ее реальное применение.
10. Зачем часто бывает необходимо проводить диффузию в два этапа.
11. Как отличаются распределения концентраций примеси по глубине полупроводника при диффузии из конечного и бесконечного источников?
12. Нарисуйте и объясните распределение примеси при ее разгонке для случая бесконечного источника.
13. Нарисуйте и объясните распределение примеси при ее разгонке для случая ограниченного источника.
14. Перечислите и охарактеризуйте механизмы диффузии.
15. Какие типы диффузантов используются при диффузии в полупроводник?
16. Приведите примеры различных типов источников примеси n -типа.
17. Приведите примеры различных типов источников примеси p -типа.
18. На примере трех различных типов источников примеси охарактеризуйте химические процессы, протекающие в объеме реактора и на поверхности полупроводниковой пластины.
19. Охарактеризуйте диффузию примеси в полупроводник как физико-химический процесс.
20. Каковы особенности технологического процесса диффузии в замкнутом и незамкнутом объемах?
21. Каковы особенности технологического процесса диффузии, изучаемого при выполнении лабораторной работы в рамках нашего курса?
22. Какова методика измерения глубины залегания p - n перехода, образованного при диффузии?
23. Зачем в конструкции промышленных диффузионных реакторов предусматриваются различные температурные зоны?
24. Достоинства и недостатки диффузионного легирования полупроводников.
25. Какие типы дефектов могут возникать при реализации диффузионных процессов?

6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОДНОСТОРОННИХ И ДВУХСТОРОННИХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

6.1. Основные определения и характеристики печатных плат

Односторонние и двухсторонние печатные платы (ОПП и ДПП) – это наиболее употребляемые конструктивные элементы бытовой и промышленной техники, с помощью которых обеспечивается:

- система печатных проводников для объединения электронных компонентов в конкретную электрическую схему;
- размещение электронных компонентов;
- монтаж электронных компонентов;
- монтаж разъемных соединительных компонентов;
- монтаж дискретных связей (проволочных, кабельных, шлейфовых);
- распределение тока между электронными компонентами.

Эти функции осуществляются реализацией системы взаимозависимых монтажных, трассировочных, конструкционных, электрических, конструктивно-технологических, эксплуатационных, надежности и экономических характеристик.

Основные монтажные характеристики ОПП и ДПП:

- количество монтируемых микросхем, разъемных соединителей, резисторов, конденсаторов и т.д.;
- количество объединяемых выводов электронных и электрических компонентов;
- площадь посадочного места микросхем;
- шаг контактных площадок для присоединения выводов микросхем;
- вид монтажа выводов компонентов (поверхностный монтаж, монтаж в отверстия);
- размещение контактных площадок для монтажа ремонтных проводников;
- размещение и форма специальных реперных знаков для автоматизированного совмещения выводов микросхем и контактных площадок;
- размещение компонентов на одной или обеих сторонах.

Основные трассировочные характеристики односторонних и двухсторонних печатных плат:

- количество каналов для размещения сигнальных проводников;
- количество сигнальных проводников;
- плотность проводников;
- топология посадочных мест микросхем;
- длина сигнальных проводников в плате;
- размер рабочего поля платы;
- толщина платы;
- размеры проводников и зазоров;
- толщина проводников;
- топология контактных площадок;
- материал проводников;
- материал изоляции;

- форма контактных площадок для поверхностного монтажа компонентов;
- топология проводников и межслойных переходов (последнее только для ДПП);
- количество сквозных отверстий в плате (для ДПП);
- плотность сквозных переходов в плате (для ДПП);
- величина взаимного рассовмещения слоев (для ДПП);
- шаг сквозных переходных отверстий (для ДПП);
- отношение толщины платы к диаметру сквозного отверстия (для ДПП);
- уровень сложности (для ДПП).

Основные конструкционные характеристики ОПП (рис. 64,а) и ДПП (рис. 64,б):

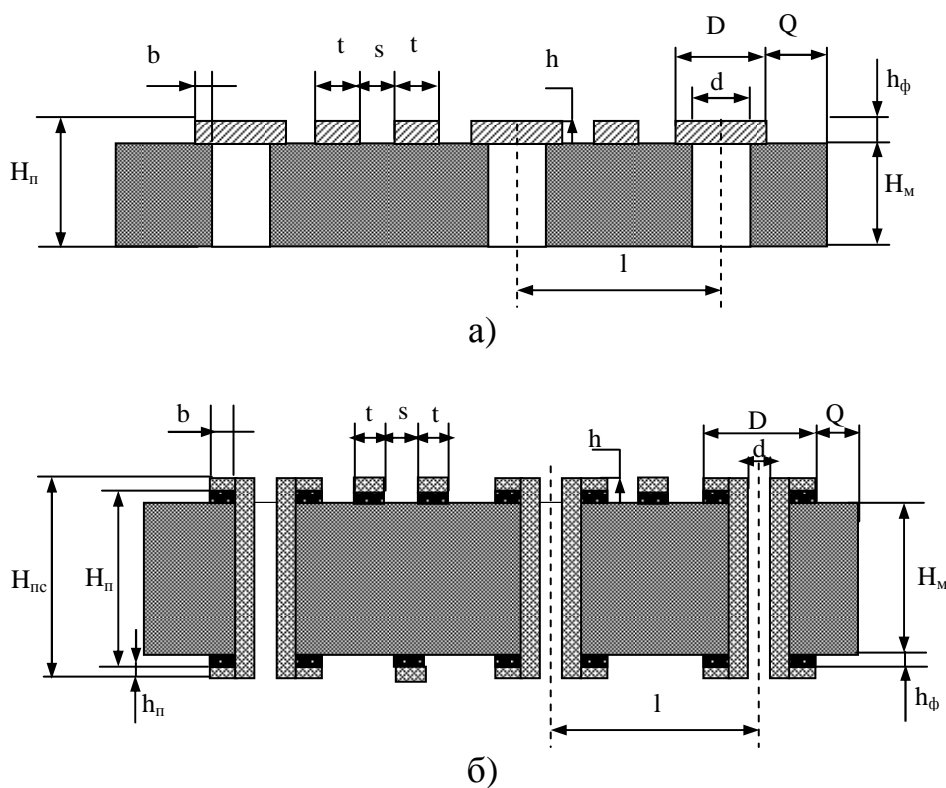


Рис. 64. $H_{Пс}$ – суммарная толщина печатной платы; $H_{П}$ – толщина печатной платы; $H_{М}$ – толщина материала ПП; b – гарантийный пояс; D – диаметр контактной площадки; d – диаметр отверстия; t – ширина печатного проводника; s – расстояние между краями соседних проводников; l – расстояние между центрами отверстий; $h_{Ф}$ – толщина фольги; $h_{П}$ – толщина химико-гальванического покрытия; h – толщина проводящего рисунка

Основные электрические характеристики ОПП и ДПП:

- погонное сопротивление проводников на постоянном токе;
- погонная индуктивность проводников;

- величина постоянного тока питания, распределяемого шинами питания и земли;
- равномерность распределения напряжения питания по полю платы;
- погонная емкость проводников (для ДПП);
- сопротивление цилиндрического проводника металлизированного сквозного отверстия (для ДПП);
- величина диэлектрической постоянной изоляции (для ДПП);
- индуктивность соединительных проводников между сквозными металлизированными переходами и контактными площадками для пайки выводов микросхем (для ДПП).

Движущими мотивами увеличения сложности печатных плат, используемых для производства электронной техники, можно считать:

- увеличение функциональной сложности и функциональной завершенности узлов на печатной плате;
- увеличение сложности и разнообразия форм электрических компонентов, монтируемых на плате.

При этом наблюдается стремление к минимизации габаритов печатных плат за счет повышения плотности монтажа компонентов и размещения компонентов на обеих сторонах печатной платы.

6.2. Методы создания рисунка проводников ПП

Рассмотрим методы получения проводящего рисунка печатных плат:

1. Субтрактивный негативный метод с применением трафаретных красок (только для ОПП).
2. Субтрактивный негативный метод с применением сухого пленочного фоторезиста (СПФ).
3. Субтрактивный позитивный метод с применением металлорезиста олово-свинец.
4. Субтрактивный «тентинг» метод (только для ДПП).

По субтрактивной технологии рисунок печатных плат получают травлением по защитному изображению в пленочном фоторезисте, трафаретной краске или по металлорезисту, осажденному в окнах, сформированных в рельефе пленочного фоторезиста на поверхности фольгированных диэлектриков. Название технологии произошло от англ. *subtract* – удалять, травить.

Первый вариант (рис. 65) – получение проводящего рисунка травлением медной фольги на поверхности диэлектрика по защитному изображению печатной краски, нанесенной сеткографической печатью.

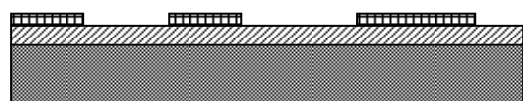
Второй вариант (рис. 66) – получение проводящего рисунка травлением медной фольги на поверхности диэлектрика по защитному изображению в пленочном фоторезисте. По полученному защитному изображению в пленочном фоторезисте производят травление меди с пробельных мест схемы. Применяется при изготовлении ДПП без переходов.

Третий вариант (рис. 67) – вытравливание проводящего рисунка по металлорезисту, осажденному на поверхность медных проводников, сформированных в рельефе пленочного фоторезиста, и, в случае ДПП, на стенки металлизированных отверстий.

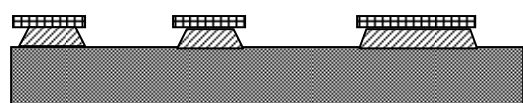
Четвертый вариант (рис. 68) – получение проводящего рисунка двухсторонних плат с межслойными переходами, т.е. с металлизированными отверстиями, путем травления медной фольги с гальванически осажденным слоем меди по защитному изображению рисунка схемы и с защитными завесками над металлизированными отверстиями в пленочном фоторезисте.



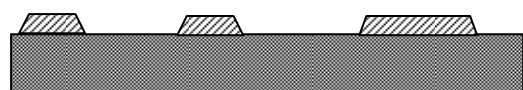
Заготовка фольгированного диэлектрика



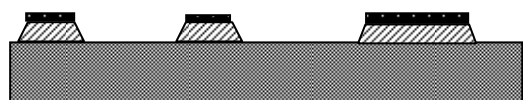
Получение защитного рисунка краски сеткографической печатью



Травление медной фольги в окнах рисунка из краски



Удаление защитного рисунка краски

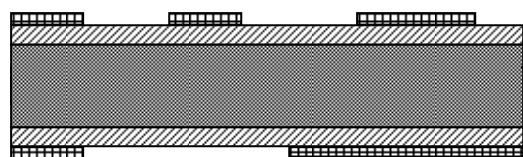


Лужение медных проводников

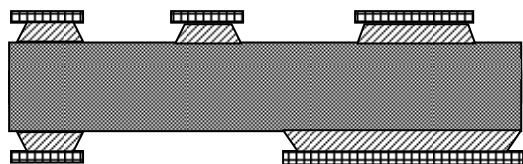
Рис. 65. Изготовление ПП субтрактивным негативным методом с применением трафаретных красок



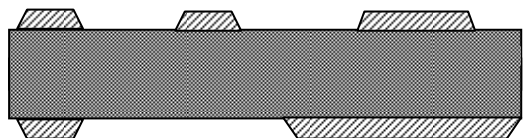
Заготовка фольгированного диэлектрика



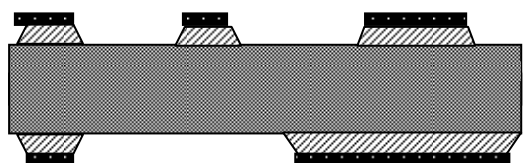
Получение защитного рисунка в СПФ (наслаивание, экспонирование, проявление)



Травление медной фольги в окнах рисунка из СПФ



Удаление защитного рисунка из СПФ

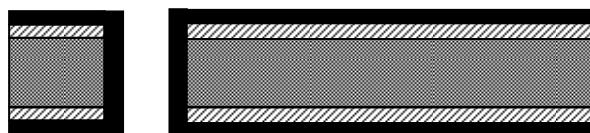


Лужение медных проводников

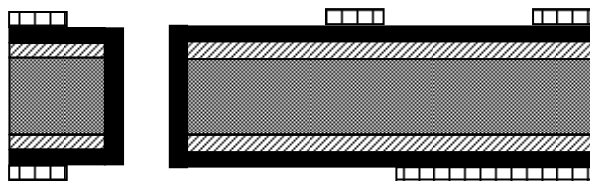
Рис. 66. Изготовление ПП субтрактивным негативным методом с использованием сухого пленочного фоторезиста (СПФ)



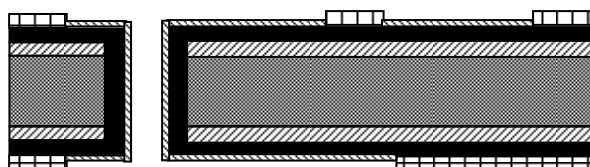
Заготовка фольгированного диэлектрика с просверленными отверстиями



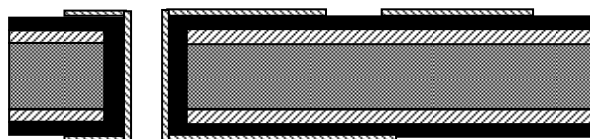
Химическая и предварительная электрохимическая металлизация всей поверхности и стенок отверстий



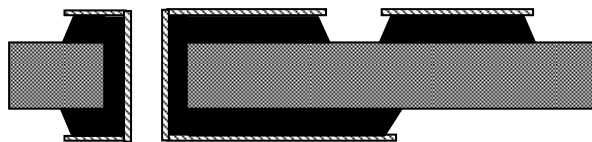
Получение защитного рисунка в СПФ (наслаивание, экспонирование, проявление)



Электрохимическое осаждение сплава олово-свинец в окна СПФ



Удаление защитного рисунка из СПФ



Травление медной фольги в окнах рисунка из металлорезиста

Рис. 67. Изготовление ПП субтрактивным позитивным методом с использованием металлорезиста

В данном процессе пленочный фоторезист наслаивается на заготовки фольгированного диэлектрика, прошедшие предварительно операции сверления отверстий, металлизации медью стенок отверстий и всей поверхности фольги. В этом процессе защитный рельеф из пленочного фоторезиста получают на местах поверхности фольги, подлежащей последующему удалению травлением.

Проводящий рисунок формируется последовательным осаждением меди и металлорезиста по рисунку освобождений в рельефе пленочного фоторезиста и на поверхность стенок отверстий. После удаления рельефа пленочного фоторезиста незащищенные слои меди вытравливаются.

В этом процессе используются свойства пленочного фоторезиста наслаиваться на сверленные заготовки без попадания в отверстия, а также образовывать изображения с глубоким рельефом. Это позволяет производить гальваническое наращивание проводников на значительную толщину без разрастания их в ширину. Поэтому обеспечивается высокое разрешение.

Профиль поперечного сечения проводников, сформированный травлением по защитному изображению в фоторезисте, имеет форму трапеции, расположенной большим основанием на поверхности диэлектрика.

Время травления определяется максимальной суммарной толщиной фольги с гальванически осажденным на поверхности фольги медным слоем. При травлении медных слоев толщиной 70 мкм заужение проводника за счет бокового подтравливания по отношению к размерам на фотошаблоне составляет 50 мкм. Разброс значений ширины проводников составляет примерно $\pm 15-50$ мкм. Минимальная устойчиво воспроизводимая ширина зазора в СПФ-2 толщиной 60 мкм – 180-200 мкм.

Из сказанного следует, что рассматриваемая технология имеет ограничения по разрешению, т.е. минимально воспроизводимая ширина проводников и зазоров порядка 200-250 мкм (при толщине проводников 50 мкм).

Для получения логических слоев с металлизированными переходами с более плотным печатным монтажом с шириной проводников 150 мкм и 125 мкм рекомендуется технологический процесс по субтрактивной технологии травлением по металлорезисту (3-й вариант субтрактивной технологии) с использованием диэлектрика типа СПТА-5 с тонкомерной фольгой толщиной 5-9 мкм.

В этом случае предварительная металлизация стенок отверстий и поверхности фольги заготовок диэлектрика производится на минимально возможную толщину 8-10 мкм.

При применении в качестве металлорезиста никеля сложность процесса в том, что слой никеля остается на поверхности проводника и несколько шире его медной части. Поэтому применение в качестве металлорезиста сплава олово-свинец с последующим его удалением (или оплавлением) является более технологичным процессом.



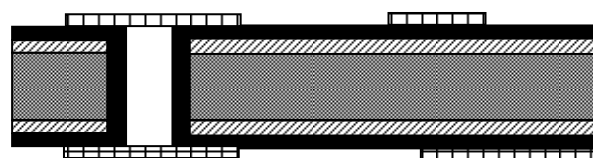
Заготовка фольгированного диэлектрика с просверленными отверстиями



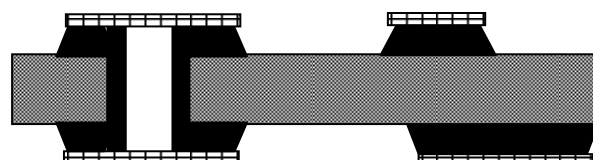
Химическая и предварительная электрохимическая металлизация всей поверхности и стенок отверстий



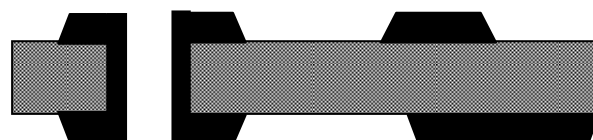
Наслаивание пленочного фоторезиста



Получение защитного рисунка в СПФ (экспонирование, проявление)



Травление медной фольги в окнах СПФ



Удаление защитного рисунка из СПФ

Рис. 68. Изготовление ПП методом «тентинг» с использованием СПФ

В этом, так называемом «*тентинговом*» процессе, или процессе образования завесок, в заготовке фольгированного диэлектрика, сверлятся отверстия и, после химической металлизации стенок отверстий, производят электролитическое доращивание меди в отверстиях и на поверхности фольги фольгированного диэлектрика до требуемой толщины. После этого наслаивается фоторезист для получения защитного изображения схемы и

защитных завесок над металлизированными отверстиями.

По полученному защитному изображению в пленочном фоторезисте производят травление меди с пробельных мест схемы. Образованные фоторезистом завески защищают металлизированные отверстия от воздействия травящего раствора в процессе травления.

В этом процессе используются свойства пленочного фоторезиста наслаиваться на сверленные подложки без попадания в отверстия и образовывать защитные завески над металлизированными отверстиями.

С основными материалами и операциями изготовления односторонних и двухсторонних печатных плат можно ознакомиться в прил. 2 данного пособия.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Тема. Изучение технологических операций и процессов изготовления ОПП и ДПП

Цель работы

1. Изучить характеристики печатных плат.
2. Изучить методы формирования рисунка проводников односторонних печатных плат (ОПП) и двухсторонних печатных плат (ДПП).
3. Изучить технологические операции и процессы изготовления ОПП и ДПП.
4. Изучить методы формирования межслойных проводников в ДПП.
5. Ознакомиться с методами контроля качества ОПП и ДПП.

Применяемые материалы

1. Набор кассет, в которых содержатся образцы после различных операций техпроцессов изготовления односторонних и двухсторонних печатных плат (образцы имеют коды, используемые при составлении последовательностей технологических операций).

Оборудование, инструменты, приспособления и контрольно-измерительная аппаратура

1. Лупа.
2. Оптический микроскоп.

Задание и ход выполнения работы

Домашняя работа:

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить необходимые экземпляры таблиц для занесения результатов лабораторных испытаний.
3. Изучить теоретические сведения.
4. Подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

Таблица 22

Процесс _____
(наименование)

Номер образца	Номер операции в техмаршруте	Наименование операции	Характерные признаки операции

Таблица 23

Образец _____ Процесс _____
(код)

Измеряемый размер	Единицы измерения	Мин./макс. величина	Обнаруженный брак
Ширина проводника	мкм		
Ширина зазора между проводниками	мкм		

Последовательность работы в лаборатории

1. Изучить последовательность операций изготовления односторонних или двухсторонних печатных плат (по заданию преподавателя).
2. Ознакомиться с перечнем основных материалов и оборудования в производстве односторонних или двухсторонних печатных плат (по заданию преподавателя).
3. Ознакомиться с описанием техпроцесса и маршрутной картой изготовления ОПП (процесс 1, процесс 2 и процесс 3) или с описанием техпроцесса и маршрутной картой изготовления ДПП (процесс 1, процесс 2 и процесс 3) в соответствии с заданием

- преподавателя (см. прил. 3).
4. Определить наименование операций, выполненных для ОПП или ДПП в соответствии с заданием преподавателя.
 5. Указать характерные признаки каждой операции, а также обнаруженные и возможные дефекты, основные виды и причины брака каждой операции. Результаты выполнения работы занести в табл. 22, в которой наименования операций и их номера записать в соответствии и в последовательности их расположения в маршрутной карте.
 6. Составить последовательность образцов согласно маршрутной карте процесса изготовления ОПП или ДПП в соответствии с заданием преподавателя.
 7. В соответствии с заданием преподавателя визуально оценить качество проводников и зазоров ОПП (ДПП). Результаты наблюдений занести в табл. 23.

Контрольные вопросы к разделу "Технологические процессы изготовления односторонних и двухсторонних печатных плат"

1. Какие методы изготовления ОПП и ДПП Вы знаете?
2. Какова последовательность формирования проводников на ОПП при изготовлении субтрактивным негативным методом с использованием пленочного фоторезиста?
3. Какова последовательность формирования проводников на ОПП при изготовлении субтрактивным негативным методом с использованием трафаретной печати?
4. Какова последовательность формирования проводников на слоях ДПП при изготовлении субтрактивным негативным методом?
5. Какова последовательность формирования проводников на слоях ДПП при изготовлении субтрактивным методом «тентинг»?
6. Какова последовательность формирования проводников на слоях ДПП при изготовлении субтрактивным позитивным методом?
7. Как производится совмещение рисунка проводников и межслойных переходов в ДПП?
8. Что Вы знаете о сверлении отверстий в печатных платах?
9. Какие способы очистки и подготовки стенок отверстий под металлизацию Вы знаете?
10. Как производится химическая и гальваническая металлизация стенок отверстий в ДПП?
11. Как производится нанесение защитной паяльной маски на поверхность ДПП:

- жидкой;
 - пленочной?
12. Какие методы нанесения паяемого покрытия на контактные площадки ОПП и ДПП Вы знаете?
 13. Какие материалы применяются для изготовления ОПП и ДПП субтрактивным методом?
 14. Как наносится маркировка на поверхность ОПП и ДПП?
 15. Что Вы знаете об автоматизации визуального контроля печатных плат?
 16. Назовите автоматизированные методы контроля качества металлизированных переходов.
 17. Назовите и поясните основные характеристики ОПП и ДПП.
 18. Назовите основные факторы ограничения увеличения габаритов ДПП:
 - связанные со свойствами материалов;
 - связанные с производственными возможностями.
 19. С какой технологической операции снят данный образец?
 20. Назовите характерные признаки данной операции.

7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

7.1. Основные определения и характеристики печатных плат

С расширением функциональных возможностей и увеличением сложности электронных устройств, создаваемых на основе микросхем высокого уровня интеграции электронных схем, происходит специализация и интеграция характеристик многослойных печатных плат этих устройств.

Многослойные печатные платы стали многофункциональными интегральными схемами связей, с помощью которых обеспечивается:

- система печатных связей для объединения электронных компонентов в конкретную электрическую схему;
- размещение электронных компонентов;
- монтаж электронных компонентов;
- монтаж разъемных соединительных компонентов;
- монтаж дискретных связей (проволочных, кабельных, шлейфовых);
- передача по связям сигналов с сохранением их формы;
- подавление перекрестных наводок между линиями связи;
- согласование связей печатными согласующими резисторами;
- распределение тока питания между электронными компонентами;
- подавление помех в цепях земли и питания (фильтрация);

- теплопередача для охлаждения микросхем.

Эти функции осуществляются реализацией системы взаимозависимых монтажных, трассировочных, структурных, конструкционных, электрических, конструктивно-технологических, эксплуатационных, надежности и экономических характеристик.

Основные монтажные характеристики печатных плат:

- количество монтируемых микросхем, разъемных соединителей, согласующих резисторов, конденсаторов и т.д.;
- количество объединяемых выводов электронных и электрических компонентов;
- площадь посадочного места микросхем;
- шаг контактных площадок для присоединения выводов микросхем;
- вид монтажа выводов компонентов (поверхностный монтаж, монтаж в отверстия);
- размещение контактных площадок для монтажа ремонтных проводников;
- размещение и форма специальных реперных знаков для автоматизированного совмещения выводов микросхем и контактных площадок;
- устойчивость контактных площадок к многократным пайкам;
- размещение компонентов на одной или обеих сторонах.

Основные трассировочные характеристики МПП:

- количество линий связи;
- количество каналов для размещения сигнальных проводников в слое;
- количество каналов в центральном сечении платы;
- плотность проводников в сигнальном слое;
- количество слоев сигнальных проводников;
- количество внутренних межслойных переходов в пределах пары сигнальных слоев;
- топология размещения внутренних переходов и проводников в сигнальном слое;
- количество внутренних переходных отверстий в плате;
- плотность внутренних межслойных переходов;
- топология посадочных мест микросхем, соединителей на монтажном слое;
- максимально возможная длина сигнальных проводников в плате;
- длина сигнальных проводников в плате;
- плотность сигнальных связей в плате;
- количество сквозных отверстий в плате;
- плотность сквозных переходов в плате.

Основные конструкционные характеристики МПП:

- размер рабочего поля платы;
- толщина платы;
- количество слоев проводников;
- количество слоев сигнальных проводников;
- количество экранированных слоев;
- количество слоев земли и питания;
- величина взаимного рассовмещения слоев;
- шаг сквозных переходных отверстий;
- шаг внутренних переходных отверстий;
- форма и размеры внутренних межслойных переходов;
- размер сквозных переходных отверстий;
- размеры проводников и зазоров в сигнальных слоях;
- форма и размеры освобождений в экранированных слоях;
- толщина проводников слоев земли и питания;
- топология проводников и межслойных переходов в сигнальных слоях;
- топология проводников и контактных площадок наружных слоев;
- материал проводников;
- материал изоляции;
- толщина изоляции между слоями;
- толщина изоляции между проводниками внутренних слоев и сквозными межслойными переходами;
- форма контактных площадок для поверхностного монтажа компонентов;
- форма и размер контактных площадок в сигнальных слоях для сквозных межслойных переходов;
- форма и размер контактных площадок внутренних переходов;
- форма контактных площадок в слоях земли и питания для сквозных переходов;
- отношение толщины платы к диаметру сквозного отверстия;
- толщина полоскового пакета с линиями связи;
- толщина изоляции между соседними шинами земли и питания;
- индекс сложности;
- уровень сложности.

Конкретные значения характеристик печатных плат определяются требованиями к устройствам и технологическим уровнем изготовления.

Для примера можно сравнить конструкционные характеристики высокоскоростных плат размером 400x450 мм для монтажа больших интегральных схем и размером 460x540 мм для монтажа сверхбольших интегральных схем (табл. 24):

Сравнение характеристик печатных плат для монтажа БИС и СБИС

Размер МПП	мм	400x450	460x540
Толщина МПП	мм	2,5	4,0
Число слоев	шт.	12	20
Ширина сигнальных проводников	мм	0,25	0,1
Шаг сквозных отверстий	мм	2,5	2,5
Число каналов в шаге сквозных отверстий	шт.	1	3
Диаметр освобождения в экранах	мм	2,3	1,6
Индекс сложности		1,6	2,4
Уровень сложности	см ² /с	0,2x10 ¹²	1,2x10 ¹²

Основные электрические характеристики МПП:

- номинальная величина волнового сопротивления линий связи;
- диапазон разброса величины волнового сопротивления линий связи;
- величина коэффициента связи соседних линий;
- величина диэлектрической постоянной изоляции;
- скорость распространения сигналов в линиях связи;
- частотная полоса пропускания линий связи;
- погонное сопротивление связей на постоянном токе;
- погонная емкость связей;
- погонная индуктивность связей;
- индуктивность шин земли и питания;
- величина сопротивления шин земли и питания;
- величина емкости между шинами земли и питания;
- величина постоянного тока питания, распределяемого шинами питания и земли;
- равномерность распределения напряжения питания по полю платы;
- сопротивление изоляции между линиями связи и шинами земли питания;
- сопротивление изоляции между шинами земли и питания;
- сопротивление цилиндрического проводника металлизированного сквозного отверстия;
- сопротивление цилиндрического проводника металлизированного внутреннего переходного отверстия;
- индуктивность соединительных проводников между сквозными металлизированными переходами и контактными площадками для пайки выводов микросхем.

Движущими мотивами увеличения сложности печатных плат,

используемых для производства электронной техники, можно считать:

- увеличение функциональной сложности и функциональной завершенности узлов на печатной плате;
- увеличение сложности и разнообразия форм электрических компонентов, монтируемых на плате.

При этом наблюдается стремление к минимизации габаритов печатных плат за счет:

- повышения плотности монтажа компонентов;
- размещения компонентов на обеих сторонах печатной платы;
- уменьшения физической и электрической длин линий связи.

Во многих случаях применения имеется потребность в повышении быстродействия линий связи. Это достигается, прежде всего, уменьшением их длины, уменьшением искажения формы передаваемых сигналов и увеличением скорости распространения сигналов. Для этих целей используется материал с малой диэлектрической постоянной и увеличивается плотность проводников и межслойных переходов.

Плотность монтажа микросхем на печатных платах определяется соотношением площадей посадочного места на плате и площади кристалла. Площадь посадочного места зависит от габаритов микросхемы, количества и геометрии выводов, а также геометрии проводников на поверхности, соединяющих выводы с межслойными переходами.

Плотность связей для корпусированных микросхем оценивается в 60-100 см/см², а для бескорпусных микросхем в 300-500 см/см².

Монтаж и коммутацию связями микросхем в корпусах со средним числом выводов и шагом выводов 0,625 мм могут обеспечивать высокоплотные печатные платы с 6-8 слоями сигнальных проводников, а для монтажа бескорпусных БИС и СБИС с шагом выводов 0,2-0,5 мм требуются суперплотные многослойные печатные платы, которые могут быть созданы при реализации предельных возможностей техники печатного монтажа с шириной проводников до 50 мкм. Повышение плотности печатных плат следует рассматривать также в направлении повышения плотности:

- экранных слоев;
- наружных монтажных слоев;
- межслойных переходов в двухсторонних сигнальных слоях;
- межслойных переходов к контактным площадкам для присоединения выводов микросхем;
- контактных площадок для присоединения выводов микросхем.

Для получения в многослойных печатных платах линий с заданным

волновым сопротивлением структура платы должна быть такой, что между слоями сигнальных проводников располагаются экранные слои. Последние представляют собой или решетки, т.е. сплошные слои металла с освобождениями для межслойных переходов, или сетки проводников. Чередование слоев земли и питания и расположение их рядом дает возможность получения высокочастотной емкости фильтра. Для увеличения этой емкости уменьшается расстояние между слоями до предельно возможного. Полезным в этом случае является диэлектрический материал с повышенной диэлектрической постоянной.

Для увеличения плотности монтажа в структуру МПП целесообразно вводить двухсторонние слои с сигнальными слоями и с межслойными металлизированными переходами. Это дает также возможность:

- уменьшить толщину МПП за счет исключения экранных слоев между сигнальными проводниками, образующими ортогональную пару;
- уменьшить требуемое число сигнальных слоев в 1,7-2 раза. Так при 6 сигнальных слоях (три двухсторонних слоя с переходами) МПП позволяет эффективно осуществить трассирование связей, которое без внутренних переходов может быть реализовано минимум на 10 сигнальных слоях;
- уменьшить количество и величину электрических неоднородностей вдоль линии связи, образуемой ортогональными участками, расположенными на обеих сторонах только одной двухсторонней платы за счет уменьшения разброса величины волнового сопротивления участков полосковых линий и уменьшения длины переходов;
- уменьшить количество сквозных отверстий, в результате чего увеличивается плотность и сводится до минимума количество торцевых контактов между контактными площадками внутренних слоев и металлизацией стенок отверстий;
- использовать унифицированные фотошаблоны экранных слоев, слоев питания и общих частей сигнальных слоев при различной трассировке сигнальных проводников.

Кроме этого двухсторонние слои позволяют несколько уменьшить величину изменения линейных размеров слоев за счет армирующего действия проводников, ортогонально расположенных с обеих сторон диэлектрика.

7.2. Технологии создания рисунка проводников на слоях МПП

Рассмотрим две технологии получения проводящего рисунка слоев многослойных печатных плат с применением пленочного фоторезиста:

1. На основе субтрактивных методов.
2. На основе полностью аддитивного формирования.

7.2.1. Субтрактивная технология получения рисунка слоев МПП

По субтрактивной технологии рисунок печатных плат получают травлением медной фольги по защитному изображению в пленочном фоторезисте или по металлорезисту, осажденному на поверхность гальванически сформированных проводников в рельефе пленочного фоторезиста на фольгированных диэлектриках.

1. Первый вариант (рис. 69). Получение проводящего рисунка травлением медной фольги на поверхности диэлектрика по защитному изображению в пленочном фоторезисте при изготовлении односторонних и двухсторонних слоев многослойных плат (МПП).
2. Второй вариант (рис. 70). Получение проводящего рисунка двухсторонних слоев МПП и слоев с межслойными переходами, т.е. с металлизированными отверстиями, путем травления медной фольги с гальваническим осажденным слоем меди по защитному изображению рисунка схемы и с защитными завесками над металлизированными отверстиями в пленочном фоторезисте («тентинг» метод).

В этом, так называемом «тентинговом» процессе, или образования завесок, в заготовке фольгированного диэлектрика сверлятся отверстия, и после химической металлизации стенок отверстий производят электролитическое доразивание меди в отверстиях и на поверхности фольгированного диэлектрика до требуемой толщины.

После этого наслаивается фоторезист для получения защитного изображения схемы и защитных завесок над металлизированными отверстиями.

По полученному защитному изображению в пленочном фоторезисте производят травление меди с пробельных мест схемы. Образованные фоторезистом завески защищают металлизированные отверстия от воздействия травящего раствора в процессе травления.

В этом процессе используются свойства пленочного фоторезиста наслаиваться на сверленные подложки без попадания в отверстия и образовывать защитные завески над металлизированными отверстиями.

3. Третий вариант (рис. 71). Применяется, в основном, при получении верхних слоев МПП путем вытравливания проводящего рисунка по металлорезисту, осажденному на поверхность медных проводников, сформированных в рельефе пленочного фоторезиста, и на стенки металлизированных отверстий.

Как и во втором варианте, пленочный фоторезист наслаивается на заготовки фольгированного диэлектрика, прошедшие предварительно операции сверления отверстий, металлизации медью стенок отверстий и всей поверхности фольги. В этом процессе защитный рельеф получают на местах поверхности металлизированной фольги, подлежащей

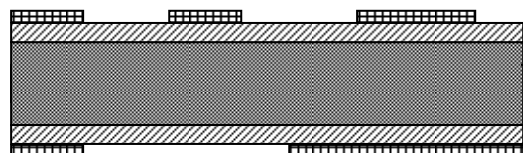
последующему удалению травлением.

Проводящий рисунок формируется последовательным осаждением меди и металлизанта по рисунку освобождений в рельефе пленочного фоторезиста и на поверхность стенок отверстий. После удаления рельефа пленочного фоторезиста незащищенные слои меди вытравливаются.

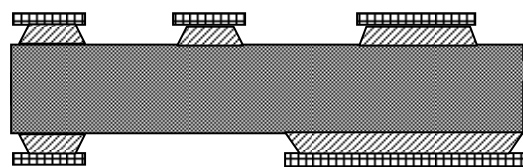
Профиль поперечного сечения проводников, сформированный травлением по защитному изображению в фоторезисте, имеет форму трапеции, расположенной большим основанием на поверхности диэлектрика.



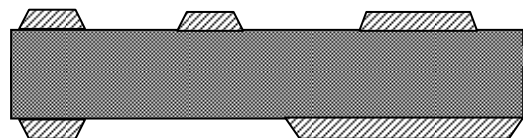
Заготовка фольгированного диэлектрика



Получение защитного рисунка в СПФ (наслаивание, экспонирование, проявление)



Травление медной фольги в окнах рисунка из СПФ



Удаление защитного рисунка из СПФ – слой готов

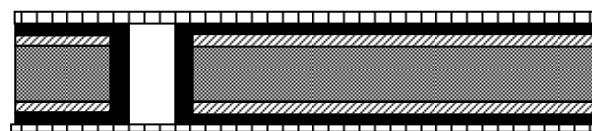
Рис. 69. Изготовление слоев МПП субтрактивным методом с использованием сухого пленочного фоторезиста (СПФ)



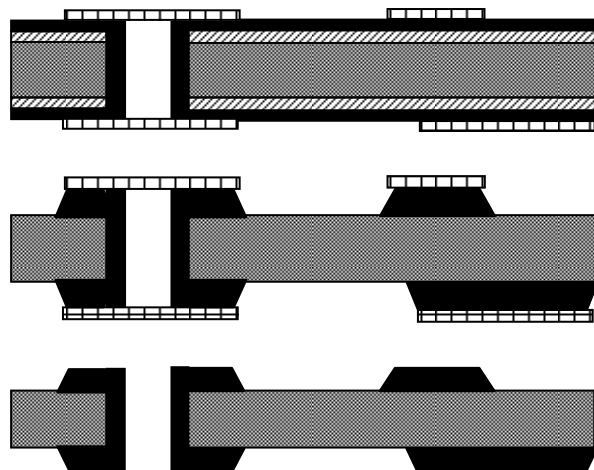
Заготовка фольгированного диэлектрика с просверленными отверстиями



Химико-электрохимическая металлизация всей поверхности и стенок отверстий



Наслаивание пленочного фоторезиста



Получение защитного рисунка в СПФ (экспонирование, проявление)

Травление медной фольги в окнах СПФ

Удаление защитного рисунка из СПФ – слой готов

Рис. 70. Изготовление слоев МПП методом «тентинг» с использованием СПФ

Анализ замеров ширины линий после травления медной фольги по защитному изображению в пленочном фоторезисте показал, что интервал разброса значений замеров увеличивается с увеличением толщины фольги. Например, при травлении фольги толщиной 20 мкм интервал разброса ширины порядка 30 мкм, а при травлении фольги толщиной 50 мкм разброс составляет 60 мкм. Искажения ширины медных проводников по отношению к размерам ширины изображений последних в фоторезисте и на фотошаблоне-негативе смещаются в сторону минусовых значений, особенно для больших толщин фольги (35 мкм, 50 мкм). Экранные слои МПП изготавливаются на фольгированных диэлектриках с толщиной фольги 20 мкм и 35 мкм травлением фольги по защитному изображению в пленочном фоторезисте.

Двухсторонние логические слои с переходами изготавливаются по «тентинговому» процессу: в заготовках фольгированного диэлектрика толщиной 0,18 мм или 0,23 мм с толщиной фольги 20 мкм сверлятся отверстия диаметром 0,5 мм. После химической металлизации стенок отверстий производится электролитическое доращивание меди в отверстиях и по поверхности фольги на толщину 30 мкм.

Разброс толщины электролитически осажденного слоя по поверхности фольги в заготовках размером 500x500 мм составляет 17-20 мкм. Максимальная суммарная толщина фольги с металлизированным слоем по краям заготовки составляет 65-70 мкм.



Заготовка фольгированного диэлектрика с просверленными отверстиями

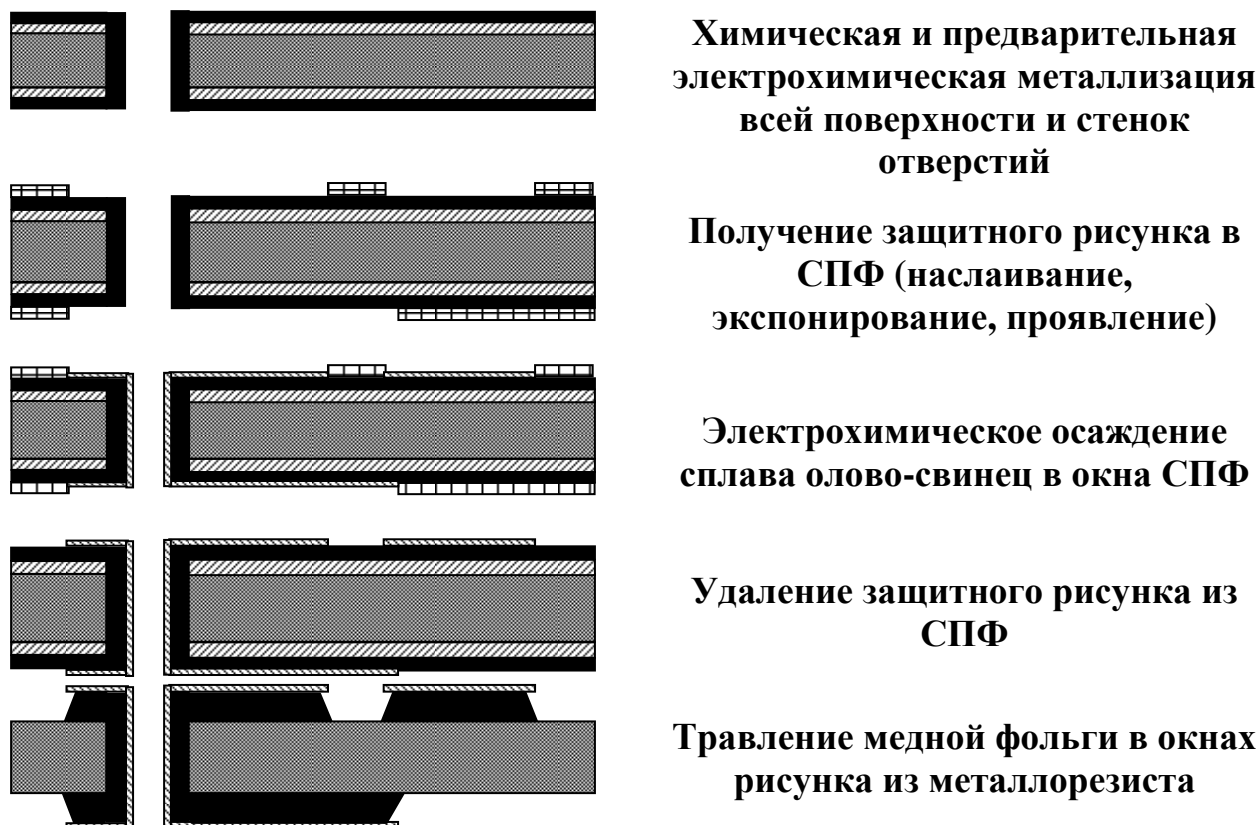


Рис. 71. Изготовление слоев МПП субтрактивным позитивным методом с использованием металлорезиста олово-свинец

Подготовка поверхностей заготовок под наслаивание пленочного фоторезиста с целью удаления заусенцев сверленных отверстий и наростов гальванической меди производится механической зачисткой абразивными кругами с последующей химической обработкой в растворе персульфата аммония или механической зачисткой водной пемзовой суспензией.

Такие варианты подготовки обеспечивают необходимую адгезию пленочного фоторезиста к медной поверхности подложки и химическую стойкость защитных изображений на операциях проявления и травления. Кроме того, механическая зачистка пемзой дает матовую однородную поверхность с низким отражением света, обеспечивающую более однородное экспонирование фоторезиста.

Для получения изображений используется пленочный фоторезист СПФ-2 толщиной 60 мкм. Толщина фоторезиста диктуется требованиями целостности защитных завесок над отверстиями на операциях проявления и травления, проводимых разбрызгиванием растворов под давлением 1,6-2 атм и более. Фоторезисты толщиной менее 45-50 мкм на этих операциях над отверстиями разрушаются. Также для обеспечения надежного «тентинга», диаметр контактной площадки должен быть в 1,4 раза больше диаметра отверстия. Минимальный поясok изображения контактной площадки (ширина между

краем контактной площадки и отверстием) должен быть не менее 0,5 мм для СПФ Ристон I и 0,7 мм для СПФ-2.

Травление по защитному рисунку проводится в струйной конвейерной установке травления типа Хемкат-568 в медно-хлоридном кислом растворе при скорости травления 35-40 мкм/мин. Время травления определяется максимальной суммарной толщиной фольги с гальванически осажденным на ее поверхности медным слоем. При травлении медных слоев толщиной 70 мкм заужение проводника за счет бокового подтравливания по отношению к размерам на фотошаблоне составляет 50 мкм.

Разброс значений ширины проводников составляет примерно $\pm 15-50$ мкм при серийном изготовлении плат в заводских условиях.

Такая точность изготовления проводников (± 50 мкм) заложена в конструкторскую документацию на платы. Следовательно, при этой технологии получения печатных элементов в готовых слоях или платах заданной ширины необходимо в размеры изображений на фотошаблоне вводить величину заужения, т.е. к номинальному значению ширины проводника прибавлять величину заужения. Например, если ширина проводника и зазора в готовом слое должны быть 250 мкм, то на фотошаблоне изображение ширины проводника должно быть 300 мкм, а зазора 200 мкм.

Минимальная устойчиво воспроизводимая ширина зазора в СПФ-2 толщиной 60 мкм – 180-200 мкм.

Из вышеизложенного следует, что такая субтрактивная технология имеет ограничения по разрешению, т.е. минимально воспроизводимая ширина проводников и зазоров порядка 200-250 мкм (при толщине проводников 50 мкм).

Для получения логических слоев с металлизированными переходами с более плотным печатным монтажом с шириной проводников 200 мкм и менее, например 150 мкм и 125 мкм, используется технологический процесс по субтрактивной технологии травлением по металлорезисту с использованием диэлектрика СПТА-5 с тонкомерной фольгой толщиной 5-9 мкм.

В этом случае предварительная металлизация стенок отверстий и поверхности фольги заготовок диэлектрика производится на минимально возможную толщину – 8-10 мкм.

Условия получения изображения в пленочном фоторезисте отличны от условий процесса «тентинг». А именно, для получения изображений используются пленочные фоторезисты с более высоким разрешением и гальваностойкостью, например СПФ Ристон I.

Подготовка поверхности подложки под наслаивание пленочного фоторезиста из-за небольшой толщины фольги и металлизированного слоя и во избежание их повреждения, проводится химическим способом: обезжириванием кашицей венской извести с последующей обработкой в 10%-м растворе соляной кислоты. Фоторезист наслаивается по специально подобранному режиму: при низкой скорости наслаивания – 0,5 м/мин, низкой

температуре нагрева валков $115\pm 5^{\circ}\text{C}$ на подогретые до температуры $60-80^{\circ}\text{C}$ заготовки. При экспонировании изображения используются установки с точечным источником света, обеспечивающие высококоллимированный интенсивный световой поток на рабочую поверхность копировальной рамы, с автоматическим дозированием и контролем световой энергии.

Фотошаблоны-позитивы имеют резкость края изображения 3-4 мкм вместо 7-8 мкм у фотошаблонов, применяемых при получении изображений с разрешением 200-250 мкм.

Проявление изображений проводится в установках проявления – процессорах в стабилизированном трихлорэтане.

Для удаления следов органики с медной поверхности подложки в каналах освобождений в рельефе пленочного фоторезиста проводится обработка в окислителе – в 20%-м растворе серной кислоты в течение 2-х минут с последующей промывкой в воде и калориферной сушкой в конвейерной струйной установке, после чего для повышения гальваностойкости защитного изображения проводится световое дублирование в светокопировальных рамах по режимам экспонирования.

Проводящий рисунок формируется в рельефе пленочного фоторезиста последовательным гальваническим осаждением меди на толщину 40-50 мкм и никеля на толщину 3-5 мкм или вместо никеля ПОС-61 толщиной 9 мкм.

После удаления фоторезиста производится травление медной фольги с металлизированным слоем суммарной толщиной 15 мкм с пробельных мест схемы. Для этого применяется травильная установка типа Хемкат-547 с медно-аммиачным травильным раствором.

В варианте использования металлорезиста ПОС-61 последний удаляется в травильном растворе Композит 603 в струйной конвейерной установке Zinn-Stripper фирмы Шмид.

При анализе шлифов заужение проводников по металлорезисту никелю у оснований составляет в среднем 30 мкм, а в узком сечении в среднем до 37 мкм; в случае травления по сплаву ПОС-61 у оснований составляет в среднем порядка 16 мкм, а в узком сечении – в среднем 28 мкм.

При применении в качестве металлорезиста никеля сложность процесса в том, что слой никеля остается на поверхности проводника и несколько шире его медной части. В этом случае заужение медного проводника нельзя учесть в размерах на фотошаблоне по следующей причине. При увеличении ширины изображения проводника на фотошаблонах будет увеличиваться ширина проводников по никелевому слою и уменьшаться ширина зазора между проводниками в готовых слоях плат.

Поэтому применение металлорезиста сплава олово-свинец с последующим его удалением является более технологичным процессом, чем применение металлорезиста никеля.

Из изложенного выше можно сделать вывод: изготовление слоев по субтрактивной технологии с применением диэлектриков с тонкой медной

фольгой толщиной 5-9 мкм обеспечивает получение проводящего рисунка с минимальной шириной проводников и зазоров между ними порядка 140-150 мкм.

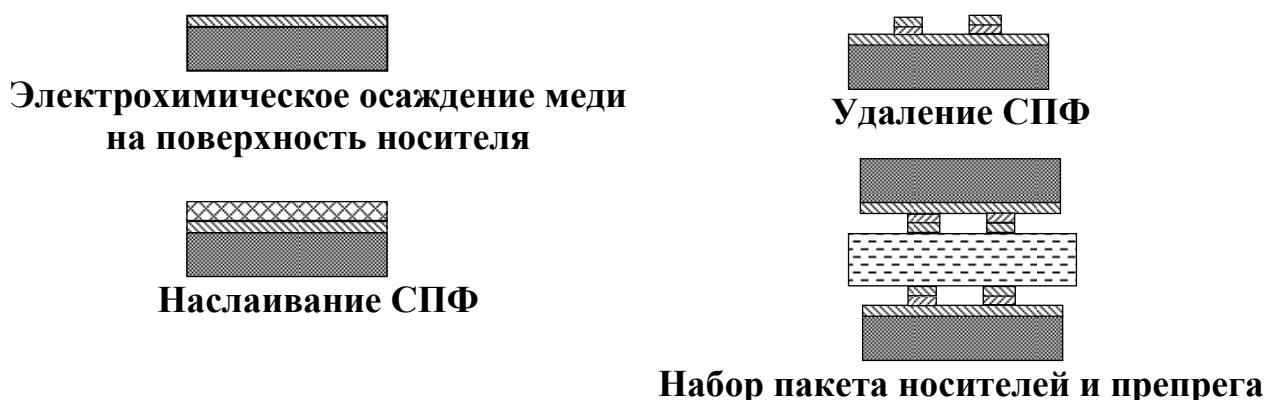
7.2.2. Технология формирования проводящего рисунка слоев МПП методом ПАФОС

Для изготовления высокоплотных плат с шириной проводников и зазоров 100-125 мкм в слоях МПП используется метод ПАФОС. Это полностью аддитивный электрохимический метод, по которому проводники и изоляция между ними (диэлектрик) формируются аддитивно, т.е. гальваническим осаждением проводников и формированием изоляции прессованием только в необходимых местах.

Метод ПАФОС, как аддитивный метод, принципиально отличается от субтрактивного тем, что металл проводников наносится, а не вытравливается.

По методу ПАФОС проводящий рисунок формируется гальваническим осаждением тонкого слоя никеля толщиной 3 мкм и меди толщиной 40-50 мкм по рисунку освобождений в рельефе пленочного фоторезиста, полученного на временных «носителях» – листах из нержавеющей стали, поверхность которых предварительно покрывается гальванически осажденной медной шиной толщиной 2-20 мкм. В защитном рельефе пленочного фоторезиста производится также нанесение адгезионных слоев на верхнюю поверхность сформированных проводников. После этого пленочный фоторезист удаляется, и проводящий рисунок на всю толщину впрессовывается в препрег или другой диэлектрик. Прессованный слой вместе с припрессованной медной шиной механически отделяется от поверхности носителей (рис. 72).

В случае слоев без межслойных переходов медная шина стравливается.



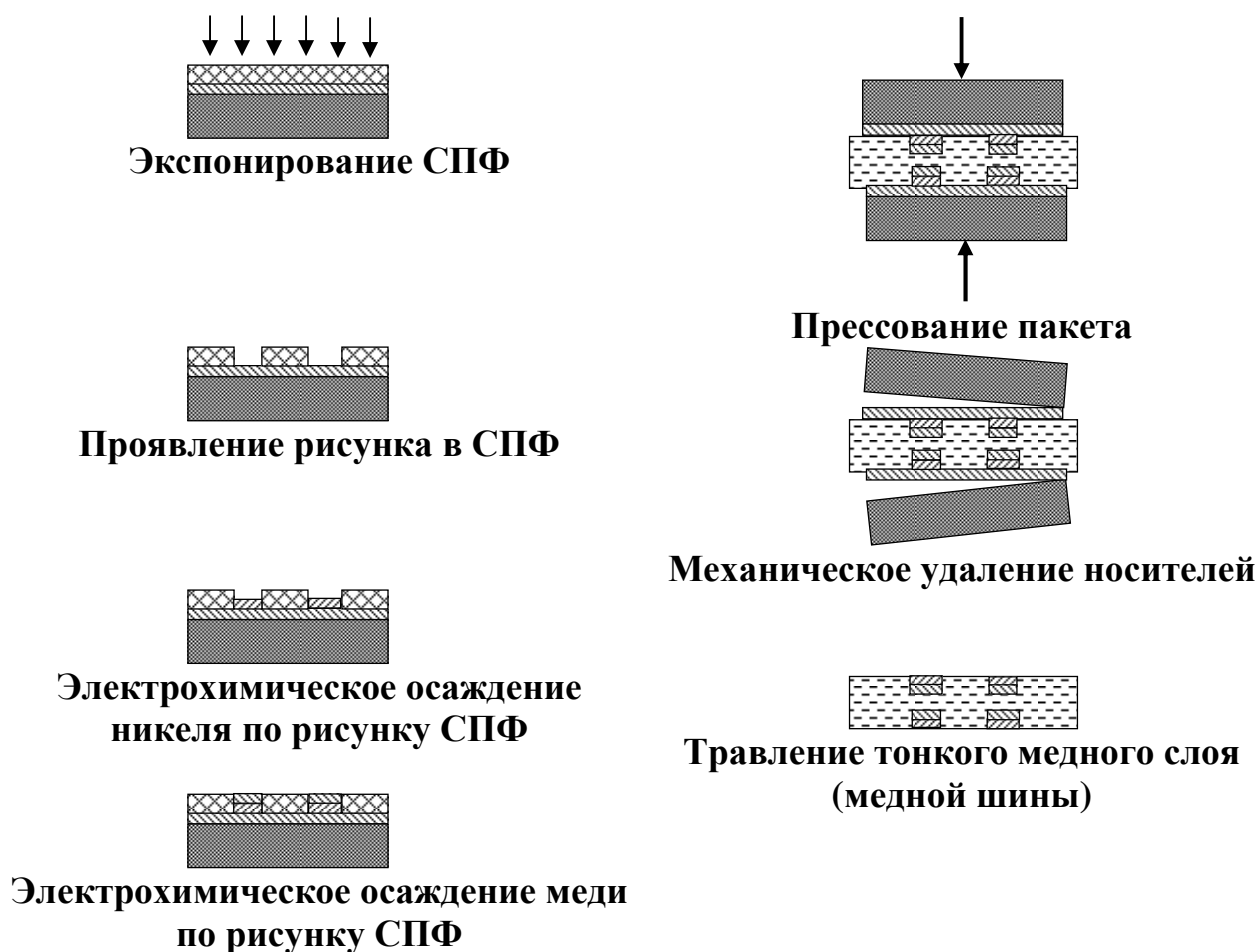


Рис. 72. Изготовление слоев МПП методом ПАФОС

При изготовлении двухсторонних слоев с межслойными переходами перед травлением тонкой медной шины проводятся операции получения межслойных переходов металлизацией отверстий с контактными площадками, после чего медные шины стравливаются.

Проводящий рисунок, утопленный в стеклоткань и сверху защищенный слоем никеля, при травлении медной шины не подвергается воздействию травильного раствора. Поэтому форма, размеры и точность проводящего рисунка определяются формой и размерами освобождений в рельефе пленочного фоторезиста, т.е. процессами фотохимии.

Лучшее качество подготовки поверхности медной шины на «носителях» обеспечивается зачисткой водной суспензией пемзы. Однако механическая зачистка не всегда применима, т.к. иногда вызывает разрушение медной шины, особенно на «носителях» больших размеров, например 500x600 мм.

Поэтому обычно применяется химическая подготовка обработкой в растворе персульфата аммония на струйных конвейерных установках.

Эта подготовка обеспечивает адгезию и химическую стойкость защитных изображений на операциях гальванического формирования проводящего рисунка и щелочного оксидирования в случае применения пленочного

фоторезиста Ристон I.

При режиме наслаивания пленочного фоторезиста на небольшой скорости $\sim 0,5$ м/мин и при температуре нагрева валков $115 \pm 5^\circ\text{C}$ на подогретые до температуры $60-80^\circ\text{C}$ заготовки достигается лучшая адгезия пленочного фоторезиста к поверхности медной шины. Этот результат обеспечивается за счет лучшего прогрева и размягчения пленочного фоторезиста и заполнения им поверхностных микронеровностей медной шины.

Условия проведения операции экспонирования для получения изображений в пленочном фоторезисте с разрешением 100-125 мкм:

- фотошаблоны должны иметь высокие оптические характеристики: оптическая плотность прозрачных полей 0,1 ед. оп. плотности, непрозрачных полей не менее 3-3,5 ед. оп. плотности, резкость края изображения не более 3-4 мкм;
- экспонирование изображений должно проводиться на установках с точечным источником света с высококоллимированным интенсивным световым потоком, с автоматическим дозированием и контролем световой энергии. Температура нагрева копировальной поверхности в процессе экспонирования не должна превышать более чем на $3-5^\circ\text{C}$ температуру помещения (температура помещения $21 \pm 1^\circ\text{C}$);
- проявление изображений должно проводиться в струйных установках с форсунками среднего и высокого давления, типа моделей процессоров В-24, С-2-50 фирмы Шмидт.

После проявления изображений с целью удаления следов органики с поверхности медной шины в узких каналах рисунка освобождений в рельефе пленочного фоторезиста следует проводить обработку в окислителе: в 20%-м растворе серной кислоты в течение 2-х минут.

Последовательность проведения операций обработки в окислителе та же, как в случае получения изображений высокоплотных схем по субтрактивной технологии с применением диэлектриков с тонкомерной фольгой.

Подбор режимов получения и проявления изображений в пленочных фоторезистах проводится на соответствие критериям качества. Качественные изображения должны иметь ровные и четкие края, однородные по цвету, блестящую и твердую для пальцев рук поверхность защитного рельефа, отсутствие «кромки» по краям изображений, полное удаление фоторезиста с неэкспонированных участков, минимальное искажение ширины проводников и зазоров между ними относительно соответствующих размеров на фотошаблонах, иметь химическую стойкость на операциях гальванической металлизации и щелочного оксидирования.

Оценка качества изображения проводится визуально под микроскопом при увеличении не менее 50 крат.

При обеспечении необходимых условий проведения процессов получения изображений в пленочных фоторезистах:

1. Ширина гальванически сформированных проводников в фоторельефе пленочных фоторезистов на высоте между уровнями от 0,2 до 0,7 толщины фоторезиста равна ширине изображения проводника на фотошаблоне. Интервал разброса замеров не превышает 25-30 мкм.
2. Искажения ширины проводников на поверхности подложки относительно размеров на фотошаблоне в среднем составляют от 10 мкм до 25 мкм.
3. Суммарный интервал разброса ширины проводников по всей высоте фоторельефа не превышает 40-50 мкм.
4. Профиль фоторельефа пленочного фоторезиста зависит от применяемой модели светокопировальной установки.

При экспонировании на установках со сканирующим или с точечным источником света, но с большим разогревом копировальной поверхности боковые стенки фоторельефа, вогнуты в глубь фоторельефа.

При экспонировании на установках с совершенной экспонирующей системой, обеспечивающей высокую коллимацию высокоинтенсивных световых лучей и отсутствие нагрева рабочей копировальной поверхности, фоторельеф имеет ровные боковые стенки с малым наклоном к поверхности подложки (примерно под углом 85 градусов).

Получение наружных слоев МПП

Прессованные пакеты многослойных плат имеют на поверхности медную фольгу обычно толщиной 20 мкм или 35 мкм. Технологическая схема получения проводников наружных слоев МПП с межслойными переходами (сквозными металлизированными отверстиями) по технологической последовательности выполнения операций похожа на приведенный выше третий вариант субтрактивной технологии, т.е. проводящий рисунок наружных слоев получают травлением по металлорезисту, осажденному на поверхность гальванически сформированных проводников в рельефе пленочного фоторезиста и на стенки металлизированных отверстий.

Согласно технологической схеме, предварительная металлизация сверленных пакетов многослойных плат по поверхности фольги или медной шины и по поверхности стенок отверстий производится на толщину 7-20 мкм.

Толщина предварительной металлизации диктуется требованиями, с одной стороны, сохранения межслойных переходов при последующих операциях обработки, с другой стороны, требованиями минимальной толщины медных слоев, подлежащих травлению (с целью уменьшения бокового подтравливания проводников). Остальная часть проводника одновременно с увеличением толщины металлизации на стенках отверстий формируется последовательным гальваническим осаждением меди на толщину 30 мкм и

металлорезиста ПОС-61 на толщину 16-20 мкм.

Для того чтобы проводящий рисунок не наращивался выше фоторельефа, используются толстые фоторезисты, в частности, СПФ-2 толщиной 60 мкм. Гальванически сформированная часть печатных элементов определяется размерами освобождений в фоторельефе.

При правильно подобранных режимах получения изображения в пленочном фоторезисте ширина проводника по металлорезисту равна размерам изображения на фотошаблоне. В процессе травления происходит одновременное травление выступающих проводников с боков. Величина бокового подтравки соизмерима с глубиной травления, т.е. суммарной толщиной медных слоев, и составляет в рассматриваемом варианте 30-40 мкм. После травления по бокам проводников имеет место нависание металлорезиста, как указывалось раньше для случая применения тонкой фольги.

При оплавлении металлорезиста ПОС-61 за счет поверхностного натяжения расплавленного припоя медные проводники покрываются ПОС-61 с заполнением пазух и выравниванием бокового профиля. Размер печатного элемента по ширине уменьшается примерно на суммарную величину нависания металлорезиста по двум сторонам.

Для плат, изготовленных по субтрактивной технологии, среднее значение ширины проводников на готовых МПП после оплавления припоя, изготовленных по субтрактивной технологии, на 75-80 мкм меньше, чем на фотошаблоне.

Применение «тентинг» метода для получения проводников наружных слоев МПП аналогично описанной ранее технологической схеме для получения внутренних слоев.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Тема. Изучение технологических операций и процессов изготовления МПП

Цель работы

1. Изучить характеристики многослойных печатных плат (МПП).
2. Изучить методы формирования рисунка проводников на слоях многослойных печатных плат.
3. Изучить методы формирования межслойных проводников в МПП.
4. Изучить технологические операции и процессы изготовления МПП.
5. Ознакомиться с методами контроля качества МПП.

Применяемые материалы

1. Набор кассет, в которых содержатся образцы после различных операций техпроцессов создания слоев и многослойного пакета многослойной печатной платы (образцы имеют коды, используемые при составлении последовательностей технологических операций).

Оборудование, инструменты, приспособления и контрольно-измерительная аппаратура

1. Лупа.
2. Оптический микроскоп.

Задание и ход выполнения работы

Домашняя работа:

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить необходимые экземпляры таблиц для занесения результатов лабораторных испытаний.
3. Изучить теоретические сведения.
4. Подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

Таблица 25

Процесс _____
(наименование)

Номер образца	Номер операции в техмаршруте	Наименование операции	Характерные признаки операции

Образец _____ Процесс _____
(код)

Измеряемый размер	Единицы измерения	Мин./макс. величина	Обнаруженный брак
Ширина проводника	мкм		
Ширина зазора между проводниками	мкм		
Ширина зазора между проводником и стенкой металлизированного отверстия	мкм		

Последовательность работы в лаборатории

1. Изучить последовательность операций изготовления слоев многослойных печатных плат.
2. Ознакомиться с перечнем основных материалов и оборудования в производстве многослойных печатных плат (см. прил. 2).
3. Ознакомиться с описанием технологических операций и технологическим маршрутом изготовления слоев МПП (процесс 1) или многослойного пакета МПП (процесс 2) в соответствии с заданием преподавателя (см. прил. 3).
4. Определить наименование операций, выполненных для слоев или пакета МПП в соответствии с заданием преподавателя.
5. Указать характерные признаки каждой операции, а также обнаруженные и возможные дефекты, основные виды и причины брака каждой операции. Результаты выполнения работы занести в табл. 25, в которой наименования операций и их номера записать в соответствии и в последовательности их расположения в маршрутной карте.
6. Составить последовательность образцов согласно маршрутной карте процесса изготовления слоев МПП или многослойного пакета МПП в соответствии с заданием преподавателя.
7. В соответствии с заданием преподавателя визуально оценить качество металлизации межслойного перехода. Результаты наблюдений занести в табл. 26.

Методические указания

При формировании рисунка слоев МПП и наружных слоев многослойного пакета фоторезист может иметь цвет от светло-голубого до

темно-синего и темно-зеленого оттенков. Резист-защита (паяльная маска) на наружных слоях МПП может иметь цвет от светло-зеленого до изумрудного в зависимости от марки резиста и фирмы изготовителя. Цвет на функциональные характеристики не влияет, поэтому не может быть браковочным признаком.

Поверхность медных слоев со временем под воздействием примесей воздуха может окисляться и поэтому может отличаться от светло-розового цвета, который можно наблюдать в реальном производстве МПП.

Контрольные вопросы к разделу "Технологические процессы изготовления многослойных печатных плат"

1. Какие методы изготовления слоев МПП Вы знаете?
2. Какие методы формирования межслойных переходов в МПП Вы знаете?
3. Какова последовательность формирования рисунка в пленочном фоторезисте и получения рисунка проводников на слоях МПП при изготовлении слоев:
 - субтрактивным методом;
 - полностью аддитивным методом (ПАФОС)?
4. Какова последовательность формирования рисунка проводников наружных слоев МПП при изготовлении:
 - с использованием металлорезиста;
 - методом «тентинг»?
5. Как производится совмещение рисунка проводников и межслойных переходов в МПП?
6. Как производится склеивание слоев в многослойный пакет?
7. Что Вы знаете о сверлении отверстий в печатных платах?
8. Как производится химическая и гальваническая металлизация стенок внутренних отверстий в слоях и сквозных отверстий в МПП?
9. Как производится нанесение жидкой защитной паяльной маски на поверхность МПП?
10. Какие методы нанесения паяемого покрытия на контактные площадки МПП Вы знаете?
11. Как наносится маркировка на поверхность МПП?
12. Назовите автоматизированные методы контроля качества металлизированных переходов.
13. Назовите виды испытаний МПП, в том числе автоматизированные.
14. Что Вы знаете об автоматизации визуального контроля печатных плат?
15. Какие материалы применяются для изготовления слоев субтрактивным методом?
16. Какие материалы применяются для склеивания слоев в МПП?
17. Какие способы очистки и подготовки стенок отверстий под металлизацию Вы знаете?

18. Назовите и поясните основные характеристики МПП.
19. Назовите преимущества МПП с внутренними межслойными переходами.
20. Назовите отличительную особенность структуры МПП с сигнальными линиями связи, имеющими заданное волновое сопротивление.
21. Назовите основные факторы ограничения увеличения габаритов МПП:
 - связанные со свойствами материалов;
 - связанные с производственными возможностями.
22. Охарактеризуйте формулу расчета надежности МПП.
23. С какой технологической операции снят данный образец?
24. Назовите характерные признаки данной операции.

Определение толщины оксидной пленки методом цветных оттенков Ньютона

Для измерения толщины пленки SiO_2 наиболее простым является метод цветных оттенков Ньютона, который основан на наблюдении интерференционных цветов в отраженном свете. За счет двойного отражения и преломления белого света, проходящего через прозрачную пленку и отражающегося от непрозрачной подложки, мы имеем возможность наблюдать эти цвета. При этом вследствие геометрической разности хода лучей возникает интерференция лучей (рис. 73), и тонкие прозрачные пленки кажутся в отраженном свете окрашенными. Цвет пленок зависит от их толщины и показателя преломления.

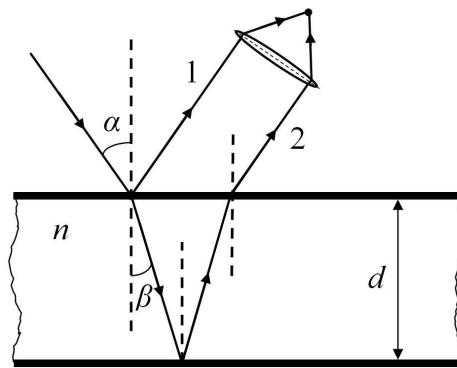


Рис. 73. Интерференция в тонких пленках: 1 и 2 – световые волны; α – угол падения; β – угол преломления; n – показатель преломления; d – толщина пленки

$$\Delta = 2 \cdot n \cdot d \cdot \sin \alpha, \text{ где}$$

- Δ – разность хода лучей, мкм;
- n – показатель преломления (для SiO_2 $n = 1,46$);
- α – угол отражения;
- d – толщина пленки, мкм.

При наблюдении отраженного света под прямым углом:

$$\Delta = 2 \cdot n \cdot d.$$

Таким образом, если известен показатель преломления материала, то по цвету пленки можно определить ее толщину ($d = \Delta / 2,92$ для SiO_2). Цветовые оттенки повторяются примерно через каждые 0,22 мкм, проходя весь спектр от фиолетового к красному, и для того чтобы однозначно определить толщину

пленки, необходимо знать порядок интерференции, т.е. какое по счету повторение цветов наблюдается. Для этого на поверхность окисленной пластинки необходимо нанести каплю плавиковой кислоты, и в окисле вытравится лунка до поверхности кремния. По периферии этой лунки будет наблюдаться ряд колец. Например, зеленый цвет окисла на четвертом кольце соответствует толщине SiO_2 0,72 мкм, а на втором кольце – 0,33 мкм. Метод позволяет определять толщину окисной пленки в диапазоне 0,05-1 мкм с точностью 30-40%.

Соотношение толщины пленок SiO_2 и цветовых оттенков приведены в табл. 27.

Таблица 27

Определение толщины пленок SiO_2 методом цветовых оттенков Ньютона

Толщина пленки (<i>d</i>), мкм	Порядок интерференции	Цвет оттенка
1	2	3
0,0500	I	Бежевый
0,0700		Коричневый
0,0960		Темно-коричнево-красный
0,1020		Индиго
0,1433		Голубовато-серый
0,1500		Светло-голубой
0,1688		Зелено-голубой
0,1700		Металлический
0,1786		Бледно-зеленый
0,1836		Желто-зеленый
0,1883		Светло-зеленый
0,1916		Зелено-желтый
0,1963		Золотисто-желтый
0,2000		Светло-золотистый
0,2200		Золотистый
0,2216		Оранжевый
0,2490		Светло-красный
0,2500		Красный
0,2700		Красно-фиолетовый
0,2753		II
0,2810	Пурпурно-фиолетовый	
0,2886	Фиолетовый	
0,3000	Фиолетово-голубой	
0,3033	Индиго	
0,3100	Голубой	

1	2	3	
0,3160		Темно-голубой	
0,3200		Зелено-голубой	
0,3400		Светло-зеленый	
0,3500		Зеленый	
0,3760		Желтовато-зеленый	
0,3830		Грязно-зеленый	
0,3900		Желтый	
0,4100		Светло-оранжевый	
0,4193		Телесный	
0,4200		Темно-розовый	
0,4400		Красный	
0,4476		Фиолетово-красный	
0,4586		Фиолетовый	
0,4600		Красно-фиолетовый	
0,4757		III	Голубовато-фиолетово-серый
0,4800			Голубовато-фиолетовый
0,4900	Голубой		
0,4983	Зелено-голубой		
0,5000	Голубовато-зеленый		
0,5200	Зеленый		
0,5403	Тускло-зеленый		
0,5526	Желто-зеленый		
0,5606	Зелено-желтый		
0,5703	Желто-серый		
0,5800	Светло-оранжевый		
0,5813	Сиреневато-серовато-красный		
0,6000	Темно-розовый		
0,6088	Карминово-красный		
0,6300	Фиолетово-красный		
0,6423	IV		Серовато-красный
0,6690		Голубовато-серый	
0,6800		Голубоватый	
0,6826		Голубовато-зеленый	
0,7200		Зеленый	
0,7700		Желтоватый	
0,7793		Бледно-розовый	
0,8000		Оранжевый	
0,8200		Желтовато-розовый	
0,8500		Светло-красновато-фиолетовый	
0,8600	V	Фиолетовый	
0,8700		Голубовато-фиолетовый	

1	2	3
0,8893		Бледно-зелено-голубоватый
0,8900		Голубой
0,9200		Голубовато-зеленый
0,9500		Желто-зеленый
0,9700		Желтый

На рис. 74 показан пример интерференционной картины, наблюдаемой на микроинтерферометре Линника МИИ-4М на поверхности полупроводниковой пластины 1, на которую нанесена прозрачная пленка 2. Сразу за границей раздела 3 (см. рис. 74) видна первая секвенция интерференционных цветов, повторяющаяся пять раз. Последний цвет пятой секвенции бледно-розовый, он же явно виден в предыдущих секвенциях интерференционной картины 4. Используя данные табл. 27, однозначно можно утверждать лишь то, что толщина пленки на поверхности кремния находится на уровне 1 мкм (выявлен V порядок интерференции). Однако точно определить толщину пленки практически невозможно ввиду субъективности оценки каждым конкретным экспериментатором наблюдаемого цвета колец интерференционной картины (например, отличить оранжевый цвет от красного еще можно, но констатировать разницу в цветах между светло-красным и красным – достаточно трудно даже для человека с отличным зрением).

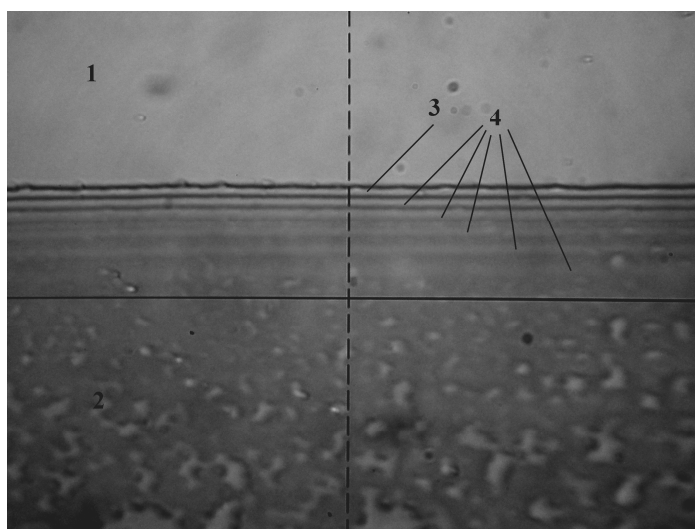


Рис. 74. Интерференционная картина на поверхности полупроводниковой пластины: 1 – поверхность полупроводника; 2 – тонкая прозрачная пленка на поверхности полупроводника; 3 – граница раздела полупроводник-прозрачная пленка; 4 – бледно-розовые цвета, повторяющихся секвенций интерференционной картины

Таким образом, данный метод является достаточно субъективным и не используется в лабораторной работе № 2 «Высокотемпературное окисление кремния».

Основные материалы и операции, используемые при изготовлении печатных плат

Фольгированные диэлектрики

Одним из основных факторов, определяющих качество и надежность печатных плат, является материал, из которого они изготовлены. Используются диэлектрики марок: ФТС, СТФ, СТАРГОФ, FR4, СТАЛ, СТПА, СОНФ, ПБМИ, полиимид ПФ, арилокс, фторопласт, стеклоткани СПТ-3-0,03 (0,06) и СПТ-4-0,03 (0,06) и др.

В производстве проводится всесторонний входной контроль и отбраковка диэлектриков перед запуском в работу.

- 1. Контроль состояния поверхности.** Диэлектрик для печатных плат не должен иметь дефектов, вносящих брак при производстве печатных плат, т.е. трещин, складок, пятен, раковин, царапин. Пластмассовая поверхность под фольгой не должна иметь участков с отсутствием смолы, выхода сплетенных волокон, ожогов, инородных материалов.
- 2. Контроль толщины.** Толщина листа диэлектрика измеряется на индикаторной головке по периметру в 10 точках. За толщину листа принимают среднее арифметическое значение, при этом предельные отклонения не должны превышать $\pm 5\%$.
- 3. Проверка устойчивости стеклотекстолита к воздействию расплавленного припоя для оценки термостойкости партии.** Проводится на 2-х образцах, изготовление рисунка – методом травления фольги. Образец не должен расслаиваться, а на фольгированной поверхности не должно быть пузырей после погружения в припой при температуре 260°C .
- 4. Определение диэлектрической проницаемости.** Из испытуемого листа фотохимическим методом изготавливают 4 образца и измеряют приведенную емкость на приборе типа Е8-4. Затем стравливают фольгу, измеряют толщину диэлектрика и по формуле подсчитывают диэлектрическую проницаемость.
- 5. Температура стеклования.** Определяется методом термоанализа.

Кроме этих, обязательных для каждой партии анализов, периодически проверяются поступившие диэлектрики на следующие параметры:

- прочность на отслаивание фольги;
- стабильность линейных размеров;
- сопротивление изоляции на электродах-гребенках;

- поверхностное и объемное удельные сопротивления.

Поверхность медных слоев со временем под воздействием примесей воздуха может окисляться и поэтому может отличаться от светло-розового цвета, наблюдающегося в реальном производстве печатных плат.

Препреги

Препрег представляет собой пропитанную специальными эпоксидными смолами стеклоткань, применяемую при производстве многослойных печатных плат в процессах сборки и прессовки пакетов.

Анализ поступившего со склада препрега начинается с проверки паспортных данных каждого рулона.

- 1. Содержание летучих веществ.** 3 образца взвешиваются на аналитических весах и помещаются в сушильный шкаф на 10 минут при температуре 163°C, а затем сразу же взвешиваются. Процент содержания летучих веществ определяют по формуле:

$$\frac{\text{потеря в весе}}{\text{первон. вес}} \cdot 100\% .$$

- 2. Содержание смолы.** Окончательный вес, полученный в предыдущем анализе, используют в качестве начального веса в этом. Тигель с образцом прокалывают в муфельной печи при температуре 538°C до постоянного веса (~15 мин), чтобы сгорели все углеродные остатки. Когда тигель остынет до комнатной температуры, снова взвешивают:

$$\% \text{ содержания смолы} = \frac{\text{потеря в весе}}{\text{первон. вес}} \cdot 100\% .$$

- 3. Текучесть смолы.** Образцы в форме квадрата со стороной 100 мм вырезаются таким образом, что одна диагональ была параллельна основе стеклоткани, а другая диагональ – параллельна утку (поперечной (горизонтальной) системе направления параллельных друг другу нитей в ткани, располагающихся под прямым углом к системе основы, и проходящих от одной кромки ткани до другой.). Образцы скрепляются вместе и взвешиваются. Масса навески должна быть 20 г. Собранный пакет помещают в предварительно нагретый пресс и выдерживают 15 мин. Из середины полученного образца вырубается квадрат со стороной 70 мм и взвешивается. Текучесть вычисляется по формуле:

$$T = \frac{M_1 - 2M_2}{M_1},$$

где M_1 – первичный вес образцов, M_2 – вес после прессования. Значения всех анализируемых 3-х параметров должны быть в пределах требований технических условий.

Наиболее важным технологическим параметром является время гелеобразования связующего, т.е. период, в течение которого смола переходит из твердого состояния через жидкое к гелеобразному. При выборе режима прессования главное – правильно определить момент приложения высокого давления. В противном случае неизбежны дефекты прессования:

- плохая связь между слоями;
- вздутие внутри печатной платы;
- мелкие пузырьки.

Первоначально широкое распространение получил метод, рекомендованный МЭК по вытягиванию нитей смолы при нагреве пакета препрега в прессе. Разработан метод определения времени гелеобразования, основанный на измерении активного сопротивления смолы в препреге, помещенном между двумя датчиками, изготовленными из фольгированного диэлектрика. Результаты измерений обрабатываются персональным компьютером и выводятся на принтер. На кривой виден четкий минимум – это время гелеобразования.

После всех анализов по результатам выбирают режим прессования и проводят опытную запрессовку. Состав опытной запрессовки: 3 листа препрега с заранее промеренной толщиной, 3 листа, облицованные фольгой с 2-х сторон.

После прессования проводится анализ спрессованного препрега. При правильно выбранном режиме прессования полностью отвердевший препрег обладает всеми свойствами базового диэлектрика, а по некоторым параметрам (сопротивление изоляции, стабильность линейных размеров) превосходит его.

Проверяют:

- процент усадки по толщине для обеспечения прецизионной толщины пакета;
- диэлектрическую проницаемость, определяющую волновое сопротивление линий связи пакета;
- процент содержания смолы не менее 45%;

- температуру стеклоперехода для корректировки в случае необходимости режима прессования МПП.

Визуально определяют монолитность, отсутствие микропустот и пузырей.

Пленочные фоторезисты

Пленочный фоторезист применяется в производстве печатных плат для получения защитных изображений при формировании проводящего рисунка печатных плат способами: травлением по защитному изображению в медной фольге на диэлектрике, гальваническим и химическим осаждением по рисунку освобождений в рельефе пленочного фоторезиста.

Пленочный фоторезист представляет собой сухой фотополимерный слой заданной толщины, заключенный между двумя прозрачными пленками: лавсановой – основой и полиэтиленовой – защитной, толщиной 25 мкм каждая. Толщина фотополимерного слоя задается в пределах от 15 до 72 мкм.

Поставляется пленочный фоторезист в рулонах, готовый для использования.

Основные достоинства пленочных фоторезистов – это способность:

- наслаиваться на плоские подложки с отверстиями без попадания в последние;
- обеспечивать воспроизведение четких изображений с глубоким рельефом;
- обеспечивать гальваническое формирование проводящего рисунка в толще фоторезиста без разрастания в ширину, тем самым сохраняя высокое разрешение;
- образовывать защитные завески «тентирование» над металлизированными отверстиями.

Эти фоторезисты имеют одинаковую структуру – фотополимерные слои негативного действия, чувствительные к экспозиции в ультрафиолетовом диапазоне спектра (320-400 нм). По способу проявления фоторезисты подразделяются на органопроявляемые и водно-щелочного проявления.

При формировании рисунка слоев ПП пленочный фоторезист может иметь цвет от светло-голубого до темно-синего и темно-зеленого оттенков.

Паяльные маски

Введение в конструкцию ПП паяльной маски (ПМ) является обязательным условием, т.к. обычная стеклоэпоксидная основа ПП не обладает достаточной теплостойкостью к температурам пайки (220-240°C), и без

паяльной маски – за время необходимое для проведения техпроцесса пайки (0,5-2,5 мин) – может происходить поверхностная деструкция материала диэлектрика.

По методу формирования рисунка паяльные маски делятся на два типа:

1. Паяльные маски, рисунок которых формируется методом трафаретной печати. Как правило, это составы на эпоксидной основе, отверждаемые термически или УФ-излучением. При относительной дешевизне основным их недостатком является низкая разрешающая способность и необходимость использования сеткографического трафарета.
2. Паяльные маски, рисунок которых формируется фотолитографическим методом (их еще называют фоторезистивные паяльные маски). Эти паяльные маски позволяют формировать рисунок любой сложности и в последнее время получили наибольшее распространение.

В свою очередь, фоторезистивные паяльные маски по методу нанесения делятся на два типа:

- а) сухие паяльные маски;
- б) жидкие паяльные маски.

Сухая паяльная маска (СПМ)

СПМ выпускается в виде пленки толщиной 50, 75, 100 и 150 мкм и по свойствам и методам использования очень похожа на сухой пленочный фоторезист (СПФ), используемый для получения рисунка печатной платы. СПМ имеет, однако, два существенных отличия, определяющие особенности ее нанесения, формирования и использования:

- СПМ является конструкционным материалом и должна выдерживать не только технологические, но и эксплуатационные воздействия во время всего срока эксплуатации ПП;
- СПМ наносится на рельеф, образованный сформированным наружным слоем ПП.

Для нанесения СПМ необходимо специальное оборудование – т.н. вакуумный ламинатор – особое устройство с вакуумной подогреваемой камерой, обеспечивающее плотное прилегание толстой пленки СПМ на рельеф ПП. Толщина СПМ выбирается из условия покрытия необходимой высоты рельефа.

$$h_{СПМ} = 0,7 h_{рельефа}$$

Следует всегда иметь в виду, что основной проблемой при нанесении СПМ является ее адгезия к поверхности ПП, поэтому перед ламинированием поверхность ПП должна быть тщательно очищена от всякого рода органических и неорганических загрязнений. Надо также помнить, что адгезия СПМ к покрытиям, изменяющим агрегатное состояние в процессе технологических обработок или эксплуатационных воздействий, может резко ухудшаться. Речь идет в первую очередь о покрытиях оловянно-свинцовыми и другими легкоплавкими припоями. Предпочтительным является нанесение СПМ на «голую» медь, допустимым – на никель, золото.

После ламинирования следуют стандартные операции экспонирования и проявления. Существуют СПМ как органического, так и водно-щелочного проявления. Последние получают все более широкое распространение в связи с более простой процедурой регенерации промывочных вод и утилизации проявочных растворов.

После формирования рисунка паяльная маска подвергается операции задубливания, которая заключается в окончательной полимеризации материала СПМ для набора им в полном объеме защитных свойств, обеспечивающих механическую, термическую и климатическую защиту поверхности ПП от технологических и эксплуатационных воздействий. Окончательное задубливание может быть термическим или смешанным: термическим и УФ.

К недостаткам СПМ можно отнести ограничение по разрешающей способности:

- 0,3 мм – для толстых (100-150 мкм) пленок СПМ;
- 0,2 мм – для тонких (50-75 мкм) пленок СПМ. Этому недостатка лишены жидкие паяльные маски.

Жидкие паяльные маски (ЖПМ)

От СПМ ЖПМ отличается только способом нанесения, обеспечивающим покрытие ПП равномерным тонким слоем. Для ЖПМ применяют два способа нанесения:

- методом трафаретной печати через чистую (без маски) сетку – этот метод является малопродуктивным и используется в мелкосерийном производстве;
- методом полива в режиме «занавеса» – этот метод требует специального оборудования, создающего падающий ламинарный поток – «занавес», и используется в крупносерийном производстве.

ЖПМ наносится тонким слоем 20-30 мкм и в связи с этим практически не имеет ограничений по разрешению при всех рисунках монтажного слоя.

Остальные операции: экспонирование, проявление, окончательное

задубливание – аналогичны СПМ.

Резист-защита (паяльная маска) на ПП может иметь цвет от светло-зеленого до изумрудного в зависимости от марки резиста и фирмы изготовителя. Цвет на функциональные характеристики не влияет, поэтому не может быть браковочным признаком.

Система базирования

От системы базирования во многом зависит выбор величины элементов рисунка, зазоров между ними, типа и габаритов платы и в конечном счете надежности и стоимости изделия.

Оснастка участка прессования выбирается с точки зрения возможности с ее помощью собирать МПП с максимальной точностью. Она включает:

- оснастку сверления и пробивки базовых отверстий в заготовках (кондуктора, штампы);
- оснастку для прессования МПП (пресс-формы).

В кондукторах выполняется сверление отверстий во вспомогательных материалах, точность сверления может быть не выше $d_{+0,1}$ мм. Пробивка баз в кондукторах и штампах выполняется с точностью $d_{(+0,005...+0,015)}$ мм. Межцентровое расстояние при этом между двумя отверстиями составляет $\pm(0,01-0,02)$ мм. Неперпендикулярность осей двух пар отверстий $\pm(0,03..0,04)$ мм.

Следует отметить, что сборка может вносить дополнительную погрешность $\pm(0,01.. 0,02)$ мм.

При размере баз диаметром 5 мм в штампах выполняется:

- пуансон диаметром $5,01_{-0,002}$;
- матрица диаметром $5,01_{+0,002}$.

В пресс-формах точность совмещения прессуемых в пакет слоев зависит от каленых втулок, запрессованных в нижнюю плиту пресс-формы. Внутренний диаметр во втулках выполняется диаметром $5,01_{+0,005}$ мм. Внешний диаметр 10 мм под запрессовку в плиту выполняется диаметром 10 и 6 мм для стальной плиты или диаметром 10 и 8 мм для дюралевой плиты пресс-формы. Штифты при этом диаметром $10_{-0,005}$ мм. При запрессовке диаметр втулки усаживается в среднем на 7-9 мкм, после чего внутренний диаметр укладывается в размер диаметром 5 ($+0,012$) мм.

Пресс-формы со стальными плитами эксплуатируются для габаритов не более 250x300 мм, штифты в них разнесены по контуру. При этом втулки выполнялись диаметром 5 мм, а штифты диаметром $4,95_{-0,01}$ мм.

Для прецизионных МПП снизить величину несовмещения слоев можно за счет изменения положения нулевого базового отверстия. Таким положением «0» целесообразно выбирать центр слоя. В результате величина несовмещения будет в два раза меньше усадки материала, так как последняя распространяется от центра во все стороны к периферии слоя.

Все три базовых отверстия располагаются на продольной оси симметрии. Центральное отверстие выполняется диаметром 5 (+0,012) мм, центральный штифт диаметром 5_{-0,005, -0,01} мм. Два крайних отверстия – пазы с шириной 5 мм при плоских штифтах. Теперь при прессовании слои имеют свободу перемещения от центра к периферии по *x* и *y*, поворот слоя гарантированно ограничен по большой стороне.

Кроме прессования, такое же базирование принято на операциях изготовления рабочих фотошаблонов, экспонирования и сверления, т.е. сквозное базирование на весь техпроцесс.

Базирование имеет ряд преимуществ:

- снижение влияния усадки материала в два раза;
- можно ввести поправку при изготовлении фотошаблонов или сверловке, условно усадка изменяется по линейному закону от центра «0»;
- облегчена сборка пакета при прессовании;
- прост процесс контроля погрешностей фотошаблона и слоя, т.к. «0» микроскопа совмещается с центром центральной базы.

Кроме названной оснастки, при изготовлении прецизионных МПП применяется сквозная оснастка метода «ПАФОС» – носитель. Для слоев габаритом 200х250 мм применим носитель габаритом 260х340 мм из нержавеющей стали толщиной 1 мм, в котором расточены три базовых отверстия: центральное – диаметром 5 мм и два крайних паза шириной 5 мм.

Введение в техпроцесс «ПАФОС» новой оснастки – носителя потребовало создания нового оборудования:

- установки щелочной очистки носителей от эпоксидной смолы;
- станка зачистки поверхности носителей;
- станка зачистки фольги с торцов носителя;
- штампов изготовления базовых шайб.

Прессование МПП

Основной отличительной технологической операцией изготовления МПП от ДПП является операция склеивания отдельных слоев прессования.

Склеивание отдельных слоев в монолитную структуру является наиболее ответственным моментом в процессе изготовления многослойных плат.

Качество выполнения этой операции определяет как механические характеристики МПП, так и ее функциональную надежность при последующей эксплуатации.

В процесс склеивания слоев входят основные операции:

- подготовка слоев перед склеиванием;
- формование пакета, т.е. сборка слоев по чертежу с определенным количеством листов препрега;
- склеивание.

Последовательность прессования представлена на рис. 75. Рассмотрим более подробно весь процесс и исходные компоненты, а также факторы, влияющие на качество склеивания.



Рис. 75. Последовательность процесса прессования

Для склеивания отдельных слоев применяется прокладочная стеклоткань – препрег (стеклянная ткань, пропитанная связующим, состоящим

из эпоксидной смолы и отвердителя). Потребители получают полуполимеризованную стеклоткань в стадии «В», т.е. подсушенную до отлипа, но сохраняющую свою склеивающую способность.

Смола, пропитывающая стеклоткань, при нагревании разжижается, превращается в гель, а затем наступает полимеризация, после которой смолу уже невозможно расплавить нагреванием.

Препрег, поступающий с заводов-изготовителей, имеет ряд технических характеристик: содержание летучих соединений, нанос смолы, текучесть, но в настоящее время практически нет показателя времени гелеобразования – важнейшего фактора выбора режима прессования.

Время гелеобразования – это время перехода смолы, расплавленной из жидкого состояния в твердое, т.е. начало образования химических связей смолы и отвердителя.

В зависимости от задач технологии, оборудования, можно проводить «горячее» или «холодное» прессование, т.е. помещать пресс-формы с пакетами МПП в горячие или холодные плиты пресса. Время геля при анализе препрега определяют по выбранному методу прессования. Соответственно выбирается режим прессования. Момент приложения второго давления является определяющим для качества изоляции МПП. Необходимо производить приложение второго давления в момент перехода смолы в состояние геля. Если приложить давление, когда смола находится в жидком состоянии, то значительное количество смолы будет выдавлено и прокладочная стеклоткань будет обессмолена, что не обеспечит качественной склейки МПП. Если приложить второе давление после геля, то будет много пустот от оставшихся летучих соединений и плохая связь между слоями.

Температура прессования выбирается в зависимости от скорости отверждения и колеблется от 165°C до 185°C.

Увеличение времени выдержки прессования до 2-х часов, поднимает температуру стеклования диэлектрика на 10-15°C, дальнейшее увеличение времени прессования улучшения качества изоляции не дает. Недостаточная продолжительность прессования ведет к увеличению брака – готовые изделия обладают способностью к вздутию, короблению, пониженной влагостойкости и наволакиванию смолы в отверстиях на медные торцы при сверлении.

Прокладочная стеклоткань, применяющаяся для склеивания МПП, должна храниться в холодильнике или камере с температурой 10-12°C и влажностью 25%. Принято хранящуюся в холодильнике стеклоткань перед прессованием выдерживать на воздухе (~2 часа) при относительной влажности 50%, но этим не достигается полное удаление влаги.

Остатки влаги внутри склеивающих прокладок являются причиной относительно частых расслоений МПП, кроме того, влага вскипает во время прессования и выталкивает размягченную смолу в облой. Таким образом, одной из причин увеличенного и вспененного облоя (помимо раннего времени подачи второго давления) является повышенная увлажненность препрега и

диэлектрика. Для сушки прокладываемой стеклоткани нельзя применять нагрев, т.к. он изменяет технологические свойства связующего – текучесть и время существования геля. Можно использовать лишь способы сублимации: выдержка в сухих камерах и вакуумирование.

Наилучший вариант – после нарезки и пробивки базовых отверстий поместить препрег в камеру и изымать непосредственно перед сборкой МПП, т.к. ресорбция влаги препрегом и внутренними слоями МПП происходит очень быстро (~30 минут).

Слои для МПП представляют собой обычные печатные платы, выполненные на тонких фольгированных диэлектриках с 1 или 2-х сторонним расположением проводников. МПП состоят из экранных слоев (слоев питания) и слоев сигнальных с переходными соединениями или без них.

Подготовка слоев перед склеиванием обычно состоит из очистки поверхности от возможных органических и неорганических загрязнений путем обработок в декапирующих и моющих растворах или растворителях с тщательной последующей промывкой в дистиллированной или деионизованной воде и термообработки с максимально возможной температурой для данного диэлектрика.

После подготовки слои подвергаются обязательной сушке в сушильном шкафу при 90°С в течение 2-х часов.

Для повышения прочности сцепления слоев с препрегом производится дополнительная обработка слоев.

Для односторонних слоев – обработка пемзой для создания шероховатой поверхности со стороны диэлектрика, т.к. односторонний диэлектрик с полимерной стороны имеет глянцевую поверхность, которая имеет тенденцию к отслоению при изготовлении МПП на последующих операциях. На слоях, имеющих большую поверхность меди, проводится оксидирование, повышающее адгезионные свойства медной фольги.

После проведения всех операций идет выборочный контроль чистоты отмывки – на сопротивление изоляции.

Окончательная сушка слоев проводится непосредственно перед прессованием, особенно во влажные дни.

Нарезка вспомогательных материалов – кабельной бумаги и триацетатной пленки может производиться заблаговременно. Кабельная бумага режется в габарит пресс-формы, а триацетатная пленка на 3-4 см больше с каждой стороны для предотвращения затеков смолы на пресс-форму и плит пресса при растекании смолы.

Базовые отверстия в бумаге пробиваются заранее, а в триацетатной пленке незадолго до прессования, т.к. она усаживается и при посадке на штыри базовые отверстия подрываются, и на поверхности МПП получают деформированные базовые отверстия, которые препятствуют получению качественного рисунка наружного слоя. Точность пробивки базовых отверстий в пленке, бумаге и стеклоткани различна. Для триацетатной пленки требуется

большая точность, т.к. несоблюдение режимов пробивки деформирует базовые отверстия. А стеклоткань формирует отверстие в соответствии с имеющейся оснасткой – точностью посадки прокладочных листов на фиксирующие штыри.

Пресс-формы и прокладочные листы должны быть очищены от натеков смолы в отверстиях и по поверхности, что гарантирует отсутствие неплоскостности (клина) при прессовании. Данные операции должны проводиться после каждой запрессовки.

Формирование пакета, состоящего из слоев, листов прокладочной стеклоткани, формирующей изоляцию межслойную, и вспомогательных деталей, обеспечивающих условия нормального склеивания, производится с учетом требуемой толщины будущей МПП.

Расчет толщины МПП обычно выполняют предварительно, замерив:

- толщины слоев фольгированного диэлектрика, т.к. он имеет разброс по номинальной толщине в соответствии с ТУ до $\pm 30\%$;
- толщины основы прокладочной стеклоткани;
- определив число листов прокладочной стеклоткани.

При этом соблюдается следующее правило: для формирования межслойной изоляции следует использовать, как минимум, два листа прокладочной стеклоткани. Толщина листов прокладочной стеклоткани, толщина слоев и число листов прокладочной стеклоткани между слоями должны быть указаны в чертеже МПП.

При сборке пакета необходимо выполнить следующие переходы:

- на нижнюю плиту со штифтами установить съемную плиту, для предупреждения прилипания смолы к штифтам необходимо смазать их противoadгезионным составом;
- на поверхность съемной плиты уложить триацетатную пленку; пакет кабельной бумаги – служит «подушкой», выравнивающей давление при склеивании;
- триацетатная пленка;
- полированная плита из нержавеющей стали – служит основой, формирующей поверхности, изъяны которой воспроизводятся на поверхности наружных слоев МПП, поэтому контроль чистоты ее поверхности должен производиться особенно тщательно;
- триацетатная пленка;
- пакет МПП, собранный по структуре с учетом толщин слоев;
- триацетатная пленка;
- полированная плита;
- триацетатная пленка – кабельная бумага – триацетатная пленка;
- съемная плита.

В зависимости от толщины МПП в одну пресс-форму можно поместить до 2-х МПП, если позволяет высота штырей, но больше нежелательно, т.к. будет неравномерный прогрев пакетов МПП и особенно при горячем прессовании, средний пакет МПП прогреется несколько позже и приложение второго давления произойдет при различных состояниях расплавленной смолы в пакетах.

Все вспомогательные материалы, слои, прокладочную стеклоткань надевают фиксирующими отверстиями на штыри пресс-формы. Необходимо следить, чтобы прокладочная стеклоткань, листы триацетатной пленки и слои одевались на штыри с небольшим натягом и ни в коем случае не изгибались. Допускается подрезка отверстий на листах кабельной бумаги и прокладочной стеклоткани с целью устранения гофра.

После сборки пакета в пресс-форму идет загрузка в пресс.

Для получения качественно спрессованных МПП необходимы прессы:

- с высокой точностью поддержания температуры плит прессы;
- с высокой точностью поддержания давления в процессе прессования;
- с возможностью автоматического многоступенчатого поднятия давления.

Более качественно осуществляется прессование на вакуумных прессах.

К преимуществам вакуумного прессования относятся:

- удаление воздуха, содержащегося между слоями и препрегом;
- более полное удаление летучих соединений при более низкой температуре, что дает возможность удалить их до начала загустевания смолы (при вакууме снижается точка кипения растворителей);
- снижение удельного давления на 20% (увеличивается % содержания смолы в спрессованном препреге).

В качестве общих положений процесса склеивания можно отметить следующие:

1. Равномерность нагрева пакета, более высокая при его загрузке в холодные плиты, т.к. прогрев происходит по мере повышения температуры на обогревных плитах, и неравномерность температуры плит прессы сглаживается теплопроводностью плит и приспособлением для склеивания. Но производительность процесса склеивания снижается.
2. Во время прогрева пакета не следует допускать максимального давления, т.к. при достижении температуры начала текучести смолы ее течение (под высоким давлением) может вызвать сдвиг проводников. Правильнее, если на период прогрева пакета до температуры на 10-15°C выше начала размягчения смолы плиты прессы просто сомкнуть на пресс-формах или

- дать минимальное давление.
3. Верхний предел температуры нагрева пакета определяет скорость реакции полимеризации. Он должен быть ниже температуры деструкции полимера не менее чем на 10-20°C. С увеличением верхнего предела температуры возрастает скорость отверждения и получается более рыхлая структура.
 4. Величина давления, прикладываемого к пакету, определяет течение смолы и равномерность заполнения ею пустот между проводниками слоев. Излишне высокое давление вызывает слишком большое выдавливание смолы при достижении ею максимума текучести, на недостаточном давлении не обеспечивается равномерность заполнения пустот рельефа. Оптимальным считается давление, при котором в процессе прессования величина облоя 5-10 мм.
 5. Суммарное время склеивания определяется временем достижения максимальной температуры склеивания, временем выдержки при максимальной температуре и скоростью охлаждения пакета. Время выдержки при максимальной температуре зависит от скорости полимеризации смолы.
 6. Охлаждение склеенного пакета рекомендуется выполнять, не снимая давления (даже на короткое время). Скорость охлаждения выбирается производителем. Температура, при которой производится разъем пресс-форм, должна быть не выше 40°C.

Для снятия напряжений в МПП после прессования используется либо дополнительное термокондиционирование, либо проводится длительное охлаждение в прессе и разъем пресс-форм через 12 часов после съема с пресса.

Обрезка облоя производится по шаблону для сохранения постоянных размеров спрессованной МПП, что необходимо участкам сверления и гальваники.

Контроль качества спрессованных МПП невозможен без разрушения пакета, в связи с чем большое значение приобретает контроль и соблюдение режима склеивания, т.е. технологическая дисциплина. В качестве косвенного контроля рекомендуется контроль величины облоя и замеры толщины спрессованной МПП, которые должны соответствовать расчетной.

Сверление отверстий

Для сверления слоев и пакетов ПП предпочтение отдается станкам, имеющим 80000-110000 об/мин шпинделя с воздушным подшипником. Биение такого шпинделя не превышает 3 мкм. Для уменьшения вибрации станки устанавливаются на воздушные подушки.

Сверление отверстий малых диаметров (от 0,5 до 0,3 мм) требует выполнения некоторых условий:

- печатная плата должна быть надежно закреплена;
- вакуумный отсос стружки эффективно убирает стружку не только с поверхности платы, но и из отверстия;
- подкладка снизу должна быть предварительно рассверлена;
- подкладка сверху (лист алюминия 0,2 мм) подкладывается только при наличии большого инструментального разброса;
- временная пауза между сверлильными циклами должна быть увеличена с 32 миллисекунд до 90 миллисекунд;
- режим резания должен точно соответствовать конструктивным особенностям печатной платы.

Требования к качеству просверленных отверстий малого диаметра в сигнальных слоях МПП:

- величина заусенца на краях просверленных отверстий не более 35 мкм;
- не допускаются разрывы контактных площадок просверленными отверстиями;
- количество отверстий для смены сверла определяется путем измерения величины притупления режущих кромок сверла, которая должна быть не более 25 мкм. Обычный сигнальный слой имеет толщину 0,25 мм. Таким образом, при сверлении, например, 800 отверстий общая длина сверления составляет 0,2 м;
- после окончания сверления всех отверстий, заложенных в программу, на технологическом поле сигнального слоя по специальной программе сверлятся 8 контрольных точек, по которым производятся измерения после каждой из технологических операций, вплоть до склеивания сигнального слоя в пакете МПП;
- общая сумма погрешностей после сверления металлируемых переходных отверстий в сигнальном слое не должна превышать 60-80 мкм.

Базовые технологические отверстия диаметром 5 мм растачиваются в сменной подкладке на расточном станке. Базовые технологические отверстия изделия (сигнальный слой МПП) формируются на пресс-форме. Подкладка и сигнальный слой МПП совмещаются при помощи технологических штырей на базовых элементах стола сверлильного станка. Метод универсален. Применяется для сверл всех диаметров. Глубина сверления выбирается минимальной, чтобы уменьшить количество поломок сверл.

Для сверления сквозных отверстий требуется специально изготовленная постоянная подкладка. Постоянная подкладка подвергается сквозному предварительному сверлению сверлом диаметром на 0,2 мм больше, чем это предусмотрено в рабочей программе сверления самого изделия. Требуется также подкладка одноразового применения из фольгированного диэлектрика

0,25 мм толщиной.

Для сверления диэлектриков с особо тонкой фольгой применяется защитная маска, предохраняющая поверхность фольги от воздействия прижимного башмака сверлильного станка 25-30 кг/см². Защитная маска – это подкладка толщиной 0,5 мм из фольгированного диэлектрика, просверленная предварительно по рабочей программе (может быть изготовлена из органического стекла).

Если есть проблемы с инструментальным разбросом, то под маску подкладывается тонкий (0,1 мм) алюминиевый лист. Такой метод позволяет получить качественное сверление особо тонких диэлектриков, не увеличивая существенно толщины сверления.

Требования к качеству отверстий малого диаметра, просверленных в ПП, с соотношением «толщина платы – диаметр сверла» более чем 10:1:

- перпендикулярность отверстия должна гарантировать отсутствие разрыва контактной площадки на противоположной стороне печатной платы;
- качество стенки просверленного отверстия может быть неодинаковым на входе и выходе отверстия из печатной платы, однако оно должно быть приемлемым и достаточным для последующей обработки отверстия в плазме;
- шероховатость стенок просверленных отверстий должна быть не более 30 мкм;
- величина заусенцев на контактных площадках медных слоев не более 10 мкм;
- метод извлечения обломка сверла из отверстия должен гарантировать сохранность этого отверстия для дальнейшей его обработки;
- при двухстороннем сверлении отверстий величина несовпадения двух, просверленных навстречу друг другу, отверстий не должна препятствовать вставлению в отверстие стального калибра диаметром на 50 мкм меньше диаметра сверла.

Глубина внедрения в материал платы твердосплавного сверла должна быть меньше длины нарезной части сверла на 2 диаметра сверла. Разрушение сверла происходит при внедрении его в материал платы на глубину в 13 раз превышающую диаметр сверла. Сверло ломается при закупоривании стружководводящей канавки и, таким образом, в большинстве случаев глубина сверления ограничивается длиной нарезной части сверла.

Методы глубокого сверления, которые ограничиваются длиной нарезной части сверла:

- метод обычного сверления всех отверстий, заложенных в программу, до определенной глубины;

- метод двухстороннего сверления плат;
- метод многоразового сверления одного и того же отверстия;
- метод сверления последовательно наращиваемой толщины печатной платы: для первого сверления выбирается толщина, которая надежно, без поломок сверл, просверливается на сверлильном станке. Для второго сверления сверху приклеивается плата (или ее часть) такой же толщины и просверливается по той же программе и так далее. Достоинством метода является очень большая (до 50:1 и больше) глубина сверления и возможность сверхглубокого сверления обычными стандартными сверлами.

При сверлении до глубины 15:1 двухлезвийными сверлами наблюдается инструментальный разброс по поверхности до 15-20 мкм и увод сверла на противоположной стороне платы до 15-25 мкм. Инструментальный разброс хорошо компенсируется алюминиевым листом 0,15-0,2 мм, накладываемым сверху. Увод сверла полностью компенсируется применением трехлезвийных сверл.

Сложные платы с большими толщинами сверлятся поодиночке. Базовые отверстия многослойных плат формируются на пресс-форме. Базовые отверстия двухсторонних плат могут изготавливаться в кондукторах и непосредственно на сверлильных станках. В платах с большими толщинами смена сверла – через 600 (400) отверстий.

Качество стенок просверленных отверстий трехлезвийными сверлами мало отличается от качества отверстий, просверленных двухлезвийными сверлами. Трехлезвийные сверла имеют прочную перемычку, хорошо выдерживают обороты шпинделя в 11000-120000, практически бесшумные в работе, но сложны в перезаточке, массового применения не получили.

Подготовка поверхности стенок отверстий

Подготовка сквозного межслойного перехода включает следующие этапы:

- удаление рыхлых, слабосвязанных с поверхностью стенки сквозного межслойного перехода, продуктов сверления;
- очистка от загрязнения («наволакивания») полимерным связующим изоляции диэлектрика контактирующих поверхностей проводников, входящих в сквозной межслойный переход;
- обеспечение адгезии меди с диэлектрической поверхностью сквозного межслойного перехода в процессе формирования металлизированного проводника;
- сохранение изоляционных свойств диэлектрика в зоне сквозного межслойного перехода.

Появление загрязнения в сквозном переходе обусловлено различными процессами физико-механического характера, сопровождающими процесс сверления ПП.

Условия резания стеклопластика с различными полимерными связующими обладают характерными одинаковыми недостатками:

- плохая теплопроводность;
- высокое адгезивное воздействие на сверло;
- неоднородность структуры (полимерное связующее, медь, стеклоткань).

Удаление рыхлых, слабосвязанных с поверхностью стенки сквозного межслойного перехода, продуктов сверления не вызывает большого затруднения, поскольку имеется много методов и оборудования для выполнения данной операции. Намного сложнее обстоит дело с очисткой от полимерного связующего контактирующих поверхностей.

Необходимость удаления «наволакивания» обусловлена следующими основными причинами:

- «наволакивание» препятствует электрическому контакту между проводниками, выходящими в сквозной межслойный переход, и формируемым цилиндрическим проводником;
- полимерное «наволакивание» в процессе пайки или оплавления может подвергнуться деструкции с выделением газообразных продуктов. Для всех полимерных материалов существует характеристика, которая для термопластов называется «температура стеклования», а для реактопластов «температура размягчения»: T_{cm} . Для большинства эпоксидных композиций отечественного производства T_{cm} лежит в диапазоне 80-120°C, а деструкция эпоксидных полимеров начинается со 180°C.

В процессе сверления МПП сверло может достигать температуры 360°C, в результате этого полимерное связующее разогревается, приобретает высокую эластичность и адгезионную способность. В ходе разогрева полимерное связующее может быть модифицировано, что приведет к изменению химических связей и изменению структуры, и может вызвать большие осложнения при удалении «наволакивания». Помимо очистки контактирующей поверхности проводника, входящего в сквозной межслойный переход, необходимо удалить часть полимерного связующего с диэлектрической стенки сквозного межслойного перехода, поскольку в момент сверления тонкий слой изоляции диэлектрика подвергается термическому воздействию.

Другим аспектом подготовки контактирующих поверхностей является обеспечение адгезии химической меди к поверхности сквозного перехода. Это

достигается с помощью механических методов, поскольку после удаления полимерного связующего образуются рыхлые продукты. Использование любых методов подготовки контактирующих поверхностей не должно ухудшать сопротивление изоляции в зоне сквозного межслойного перехода за счет возникновения металлизированных капилляров.

Имеющиеся в настоящее время методы подготовки контактирующих поверхностей можно разделить на следующие группы:

- 1) механическая подготовка;
- 2) химическая подготовка;
- 3) плазмохимическая подготовка.

С появлением плазмохимической очистки все эти методы условно можно разделить на «мокрые» и «сухие».

Для МПП механические методы подготовки применяются только в комплексе либо с «мокрыми», либо с «сухими» методами. Наибольшее распространение из механических методов получил метод гидроабразивной обработки, суть которого заключается в создании водной пульпы электрокорунда или пемзы в определенном соотношении и подачи их с помощью сжатого воздуха, или насоса через форсунки на обрабатываемые отверстия. Сама очистка осуществляется за счет кинетической энергии абразивных частиц. Этот метод хорошо применять в тех случаях, когда сквозные межслойные переходы имеют большой диаметр и толстую медную фольгу наружных слоев. Однако в случае перехода к МПП с малыми сквозными переходами и тонкой фольгой наружных слоев появляются явления «наклепа» фольги, создающие экранирующий эффект над отверстием межслойного перехода. Это приводит к следующему:

- трудно полностью удалить абразивные частицы;
- при химической обработке растворы труднее удалить.

Прогрессивным методом считается применение струй воды высокого давления (более 60 бар), поскольку здесь отсутствует эффект «наклепа», нет необходимости удаления абразивного порошка. Этот метод наиболее применим для глубоких сквозных отверстий. Но в случае тонкомерной фольги, толщиной 5-12 мкм, необходимо контролировать состояние фольги наружных слоев с тем, чтобы избежать необратимых разрушений.

Из химических методов в настоящее время наибольшее развитие и распространение получили следующие:

- подготовка поверхностей с помощью серной и фтористоводородной кислот как в смеси, так и отдельно;

- подготовка с использованием хромового окислителя;
- подготовка с использованием щелочного раствора перманганата калия.

В России наибольшее распространение получил метод с использованием кислот, тогда как за рубежом большое распространение получил метод с использованием хромосодержащего окислителя. Необходимо отметить, что в настоящее время усиленно рекламируется перманганатный метод, который пока широкого распространения не получил.

Однако необходимо помнить, что химические методы не являются универсальными, а направлены на один или максимум на два типа полимерных связующих, что существенно снижает их эффективность, особенно при создании МПП на новых материалах.

Помимо этого выявлено, что химические методы очень сложно использовать при очистке глубоких отверстий. Это обусловлено тем, что глубокие отверстия приобретают свойства капилляров, а это, в свою очередь, затрудняет удаление из них раствора и приводит к различным дефектам. Кроме того, скорость травления в кислотных травителях является трудно управляемым процессом, так за несколько секунд может быть стравлено свыше 60 мкм эпоксидного диэлектрика. На скорость травления влияет плотность и концентрация кислот, температура и степень полимеризации связующего изоляции диэлектрика.

При этом может происходить проникновение травящего раствора за счет капиллярных сил внутрь изоляции диэлектрика по границе раздела «полимерное связующее-стеклоткань». Здесь предположителен следующий механизм: во время сверления происходит расщепление между полимерным связующим и стеклотканью, из-за плохого удаления аппрета в эту полость проникают насыщенные пары травителя, которые и увеличивают размеры этого капилляра. В процессе металлизации по этому капилляру осаждается медь, что приводит к образованию паразитных емкостей, снижению сопротивления изоляции диэлектрика в зоне сквозного перехода вплоть до образования короткого замыкания.

Аналогичные дефекты просматриваются и у других химических методов очистки, поэтому они не пригодны при изготовлении высокоплотных МПП с большим отношением толщины к диаметру. Кроме этого, все эти методы являются очень токсичными для персонала и требуют соблюдения специальных условий работы и оборудования. Вследствие высокой коррозионной активности срок службы оборудования ограничен. Помимо этого, встает много проблем с утилизацией отработанных растворов, которые обладают высокой экологической опасностью, т.к. кислотные травители содержат фенолы, а другие – соли тяжелых металлов, такие как хром и марганец. Исходя из всего сказанного выше, более безопасным и более технологичным является метод плазмохимической подготовки. Начиная с 1975 года, идет постоянный поиск улучшения оборудования и технологии подготовки контактирующих

поверхностей плазмохимическим методом. Но побочные эффекты не дали возможность сразу и широко применить этот метод.

Плазма образуется при внешнем электрическом воздействии с помощью различного рода газовых разрядов в сильных постоянных и переменных электрических и постоянных магнитных полях. Характерная частота переменного электрического поля – от единиц килогерц до единиц гигагерц. В зависимости от фирмы и типа оборудования используются все эти частоты. Так, фирма «Техникс-Плазма» ФРГ для моделей (3017E; 3027E; 3067E) использует частоту 40-45 кГц, а в моделях 3007S – 2,45 ГГц. Использование тех или иных частот обязывает внимательно относиться к времени обработки, поскольку увеличение частоты приводит к резкому разогреву диэлектрика за счет диэлектрических потерь. При протекании плазменного процесса в ограниченном объеме реактора происходит как ионизации, так и рекомбинация. Кроме того, плазма обладает различными видами излучений, где не последнее место занимает ультрафиолет.

Суть плазмохимической очистки или подготовки составляет процесс плазмохимического травления полимерного связующего диэлектрика: основу процессов плазмохимического травления составляют химические реакции энергетических частиц плазмы с материалом на его поверхности. Инициирование таких реакций возможно только при наличии высокой химической активности частиц плазмы. Для проведения этой очистки применяется газоразрядная плазма, использующая в качестве газовой среды кислород и фреон. Под действием высокочастотного электрического поля молекулы кислорода и фреона переходят из стабильного состояния в возбужденное, и при этом образуются: активные молекулы, активные атомы, свободные радикалы, ионы, электроны.

В процессе плазмохимического травления более 90% активных частиц составляют свободные радикалы, которые и представляют собой главный источник реакционной способности плазмы. Число ионов, участвующих в процессе, не превышает нескольких процентов от числа радикалов, следовательно, процесс протекает по радикальному механизму.

Подготовка контактирующих поверхностей заключается в следующем:

- механическое удаление рыхлых, слабосвязанных остатков продуктов сверления;
- разрушение полимерного связующего на контактирующих поверхностях;
- механическое удаление остатков полимерного связующего после разрушения.

Обычно в России для исполнения этой схемы используют гидроабразивное оборудование и установки кислотного травления. Однако наиболее оптимальным является оборудование, использующее струи высокого

давления, фирм «Шмид» и «Реско».

Помимо модуля струй высокого давления в эти установки входят модули с абразивными валками и блоком ультразвуковой отмытки, и блоком сушки на выходе.

Эти установки позволяют снимать заусенцы после сверления и удалять окисленный или ингибированный слой с поверхности фольги. Для разрушения полимерного связующего и подготовки контактирующих поверхностей используется установка 3067E фирмы «Техникс-Плазма». Эта установка обладает высокими технологическими характеристиками. Разработаны методики для подбора оптимального технологического режима. Суть методик заключается в том, что при разных технологических режимах полимерное связующее удаляется с разной скоростью и по разнице веса, переведенного на процент потери массы, дается заключение о его эффективности. Существенным является то, что процент потери массы должен превышать процент влагопоглощения на данный конкретный диэлектрический материал.

Плазмохимическая обработка обладает универсальностью. За счет подбора режима травлению подвергаются эпоксидные композиции, метилметакрилаты, полиимиды, а также фторопласты. При определении технологических режимов, куда входит определение соотношения рабочих газов кислород/фреон 14, мощность, передаваемая в реактор, время обработки, установлено, что для большинства эпоксидных композиций максимум травления приходится на соотношение кислорода к фреону, как 80% к 20%, рабочее давление 0,2-0,3 Мбар, мощность 3,0-3,3 кВт и время от 15 до 40 минут.

Выбор времени плазмохимической подготовки зависит от толщины наволакивания полимерного связующего. В связи с этим разработана классификация качества сверления – величина наволакивания.

Оценка качества сверления:

- до 2 мкм – отлично;
- до 5 мкм – хорошо;
- до 6 мкм – удовлетворительно;
- до 8 мкм – неудовлетворительно;
- свыше 8 мкм – совершенно неудовлетворительно.

Наволакивание свыше 5 мкм нежелательно. В реальном производстве бывают случаи, когда величина наволакивания превышает толщину 5 мкм, тогда цикл повторяют и, как правило, все очищается.

После разрушения полимерного связующего на контактирующих поверхностях необходимо удалить остатки продуктов реакции и подготовить поверхность стенки сквозного перехода под химическую металлизацию. Для этой цели используется установка «Комби-Браш». Создаваемое ею давление

воды около 100 бар позволяет эффективно очищать сквозной межслойный переход от различных видов загрязнений.

Современные методы подготовки контактирующих поверхностей в высокоплотных МПП базируются на комбинированном методе с применением гидромеханической очистки струями высокого давления и плазмохимической очистки.

Гальваническая металлизация

Трудности процесса гальванической металлизации заключаются в том, что сложно сохранить хорошее отношение распределения толщины слоя от середины отверстия до поверхности в 0,8:1 и обеспечить малый разброс толщины покрытия на всей поверхности. В этом процессе работают с обычными сернокислыми медными электролитами с типичным составом (плотность тока 2-6 А/дм²):

- 180-200 г/л серной кислоты;
- 20-25 г/л меди;
- 60-100 мг/л хлорида;
- блескообразователь и т.д.

Для ПП с малыми диаметрами сквозных отверстий (большим отношением толщины платы к диаметру отверстия) требуются модифицированные электролиты с типичными показателями 200-220 г/л серной кислоты (плотность тока 0,3-1 А/дм²):

- 15 г/л меди;
- 30-80 мг/л хлорида;
- специальные органические добавки.

Чтобы достичь хорошего результата, нужна оптимизация экранов (проводящие – непроводящие) и распределения катодов и анодов.

Химическая металлизация

Первоначально медные растворы были так называемого типа тонкого наращивания, разработанные для температурного интервала 25-30°C и осаждения от 0,25 до 0,5 мкм. На платах затем гальванически наращивалась медь от 5 до 7 мкм перед формированием рисунка.

В настоящее время введены системы среднего наращивания – от 2,0 до 3,0 мкм меди, вследствие чего исключается необходимость гальваники перед формированием рисунка.

Для получения такой меди необходимо не только мастерство химического осаждения, но и знание инженерных деталей процесса. Ключевые

из них следующие:

- применение системы стабилизации;
- хорошая циркуляция раствора ванны;
- использование чистых химикатов и концентратов;
- применение автоматизированного дозирования для добавления химикатов;
- непрерывная автоматизированная система анализа;
- точный контроль плотности раствора.

Система стабилизации включает в себя:

- фильтрацию раствора;
- барботаж воздухом;
- охлаждение раствора химического меднения после работы и нагрев его перед работой;
- использование эффективных стабилизаторов.

Добиться высококачественного контроля и обеспечить стабильность ванны без эффективной фильтрации практически невозможно. Грязь или нерастворимые частицы могут действовать как центры кристаллизации, на которых инициируется беспорядочное выделение меди, ведущее к самопроизвольному разложению раствора. Непрерывная фильтрация является одним из действенных способов предотвращения этого разложения и сокращения времени на последующую очистку ванн и коммуникаций. Для снижения энергии активации и, соответственно, замедления скорости реакций металлизации полезно охладить раствор меднения на 2-3°C.

Во время хранения ванны желательна непрерывная циркуляция или легкая аэрация ванны воздухом. Как показывает опыт работы, на каждые 190-200 л раствора, как минимум, необходим один фильтрующий патрон высотой 250 мм и размером пор не более 15 мкм. Важным моментом, контролирующим реакцию химического меднения, является применение стабилизирующих компонентов, предотвращающих разложение раствора.

Относительное удлинение высококачественной меди составляет 6-8%, прочность на разрыв 35-40 кг/см², после сушки в течение 1 часа при температуре 120°C относительное удлинение возрастает до 12-15%.

Такую медь можно получить при скорости осаждения 3-4 мкм/час. Для этого необходима комбинация таких свойств, как устойчивость, предельная плотность загрузки и постоянная скорость осаждения.

Предельную загрузку можно менять в довольно широких пределах путем изменения кратности циркуляции раствора. Для этого корректировку ведут не в рабочей ванне, а в отдельном отсеке рабочей ванны (вспомогательная или циркуляционная ванна), через который циркулирует определенная часть раствора из рабочей ванны. В нем раствор аэрируется сжатым воздухом,

освобождается от растворенного в нем водорода, подпитывается корректирующими растворами и после фильтрации возвращается в рабочую ванну. Это дает возможность увеличить адгезию слоя химической меди в 1,5-2 раза и скорость металлизации в 2-2,5 раза.

Циркуляция раствора способствует и лучшему удалению водорода из зоны реакции, что уменьшает степень наводороживания покрытия и повышает его качество. Это особенно важно при щелочном активаторе, когда адсорбируется органический комплекс палладия и формирование ядер палладия последует за восстановительной деструкцией водородной связи с выделением водорода. В этом случае палладиевая частица, обильно заряженная водородом, вводится в ванну меднения и ускоряет процесс рекомбинации и десорбции, особенно в начальной фазе меднения, значительно снижая время индукционного периода начала реакции. Конечно, такая ванна с комбинированной системой активатора и восстановителя дает металлизацию высшего качества при условии быстрого удаления водорода из зоны реакции. Поэтому очень важно, чтобы все частички палладия были покрыты медью, т.к. в обнаженном состоянии они выделяют абсорбированный водород. Количество частиц палладия размером 5-30 нм может достигать 10-15 на 1 см² и непрерывное газообразование, в свою очередь, приведет к образованию микроканалов по всей толщине гальванического покрытия. Это усилит проникновение влаги к внутренней поверхности покрытых отверстий и слою химической меди, вызывая ее окисление и образование окисной пленки. При этом общее поперечное сечение проводников уменьшается, и увеличивается их электрическое сопротивление. После продолжительных термоциклов в некоторый момент сопротивление изменится от долей мОм до десятков мОм, и электрическая цепь отказывает. Наличие изолированного водорода (так называемая окклюзия) возникает вследствие повышения скорости осаждения. Тогда водород до начала десорбционного процесса окружается растущей пленкой меди. Пузырьки водорода, во-первых, препятствуют сплошному осаждению меди и, во-вторых, когда они лопаются на этих микроучастках, образуются солевые включения. При эксплуатации под воздействием атмосферной влаги на этих участках образуется электролит, который распространяется по микроканалам стеклопластика, снижая сопротивление изоляции, вплоть до отказа платы. Там, где медь полностью покрывает палладий, микропустоты не образуются и, следовательно, раствор не попадает между осаждаемой медью и стенкой отверстия. Поэтому пайка в этом случае будет протекать быстрее, так как нагревается только медь. А там, где имеется захваченная влага, она будет удлиняться.

Интенсивная хорошая циркуляция раствора ванны, снижение скорости осаждения, «отжиг» путем горячей промывки или сушки-меры, которые помогают достичь необходимого качества химической меди.

Весьма существенное влияние на качество металлизации оказывает чистота воды и химических реагентов. Недопустимо применение для

приготовления и пополнения технологических растворов водопроводной воды. Для промывки печатных плат рекомендуется применять дистиллированную или деионизованную воду.

Горячее лужение (оплавление)

Операция заключается в нанесении паяемого покрытия на контактные площадки (КП), к которым в дальнейшем будут присоединены выводы компонентов. Покрытие должно быть равномерным, чтобы не нарушить дозировку припоя на КП, и сохраняющим паяемость в течение всего времени межоперационного хранения ПП. Производится эта операция окунанием ПП в расплавленный припой (как правило, оловянно-свинцовую эвтектику – ПОС-61) на несколько секунд, а затем протаскиванием платы между двумя узкими соплами, через которые продувается горячий воздух, сдувающий излишки припоя с поверхности ПП и из отверстий. Толщина покрытия и равномерность его определяется правильным выбором расстояния до сопел и их наклоном относительно плоскости платы.

При субтрактивном способе изготовления платы, с использованием олово-свинца в качестве металлорезиста, то же назначение имеет операция оплавления, которая производится до нанесения паяльной маски.

При описываемых операциях ПП подвергается значительному термическому воздействию, близкому к термоудару, что приводит к проявлению скрытых дефектов, заложенных на предыдущих этапах изготовления. Таким образом, эти операции можно считать методом 100% технологических испытаний, обеспечивающих отбор плат с повышенной надежностью и эксплуатационной стойкостью.

Маркировка

Операция, заключающаяся в нанесении на поверхность ПП специальной краской обозначений компонентов и их посадочных мест. Наносится методом трафаретной печати. Качество определяется допустимым разрешением по толщине линий (0,15 мм минимум), размером выполняемых шрифтов (1,3 мм минимум) и достигается оптимальным выбором вязкости краски и параметров сетки.

По содержанию маркировка необходима в большей степени при наладке, ремонте, визуальном контроле узлов, собранных на ПП. Однако в малосерийном производстве, когда размещение компонентов на ПП (особенно плотной) производится полуавтоматически или вручную, наличие маркировки существенно облегчает процедуру размещения компонентов.

Электрический контроль ПП

Основные требования к системам контроля связей плат нового поколения

сводятся к следующим:

- универсальность контактного устройства, т.е. возможность контроля плат с расположением контрольных точек в любых узлах заданной координатной сетки в пределах максимального поля контроля;
- параметрический контроль сопротивлений связи и изоляции цепей с индивидуальным заданием допустимых значений этих параметров для каждой цепи в программе контроля (таблица цепей);
- полное, исчерпывающее диагностическое описание выявленных дефектов, т.е. указание номера дефектной цепи (по конструкторской документации) и реальных координат всех точек, разъединенных в результате обрыва цепи, указание номеров цепей, между которыми имеется короткое замыкание и т.д.;
- объем контролируемого монтажа системы должен соответствовать максимально возможному количеству контрольных точек на плате;
- достаточно высокая производительность контроля, обеспечивающая требуемый уровень производства;
- высокие эксплуатационные качества, надежность, технологичность, удобство технического обслуживания.

Качество металлизированных переходов определяется измерением сопротивления проводника (R_{MO}) – металлического цилиндра перехода. Для этого с помощью одной пары контактов пропускается ток, а с помощью второй пары контактов измеряется падение напряжения (рис. 76):

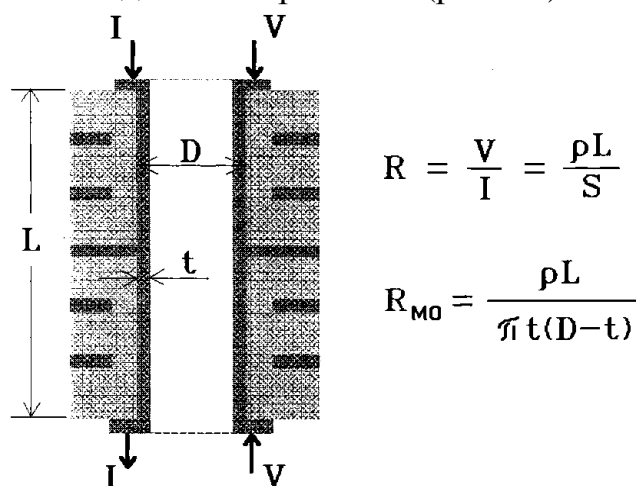


Рис. 76. Определение качества металлизированных переходов

Испытания ПП

Изучение причин отказов связей в МПП показывает, что в основном эти отказы вызваны разрывами в районе соединений межслойных переходов. Наиболее часто разрывы появляются в сквозных металлизированных

отверстиях. По частоте возникновения разрывов на первом месте стоят районы углов на выходах отверстий, на втором месте – районы соединения внутренних слоев с металлизацией стенок отверстий. Не редки также случаи разрыва самой металлизации на стенках отверстий.

Последний вид отказов обусловлен, как правило, сильной шероховатостью стенок, недостаточной выравнивающей способностью электролита меднения, наличием непрокрытых или со значительно протяженным или местным утоньшением металлизации, а также низкой пластичностью меди. Указанные причины также способствуют образованию отказов и в первых двух видах.

Рассмотрим конструктивные особенности критических районов межслойных переходов и способы увеличения их надежности. Основное внимание должно быть уделено увеличению площади контактов и совершенствованию их формы с целью увеличения устойчивости к механическим нагрузкам. В широко используемом в последнее время способе увеличения площади контактных поверхностей на стенках в просверленных отверстиях стравливается не только смола, но также стекловолокна на глубину до 30-50 мкм. Этим стремятся открыть боковые поверхности контактных площадок и образовать замковое соединение контактной площадки и металлизации стенки отверстия.

Совершенствования конструкции переходов проводится с целью:

- уменьшения толщины диэлектрика, сквозь который осуществляется переход, для уменьшения величины расширения;
- увеличения площади контактирования внутренних проводников и металлизации отверстия;
- увеличения толщины металлизации в отверстии и в проводящих слоях, выступающих в отверстия;
- согласования толщины соединяемых элементов конструкции перехода;
- стабилизации структуры стенок отверстий на стадии подготовки под металлизацию;
- увеличения содержания стеклоткани в зоне сквозных отверстий;
- увеличения степени полимеризации смолы во всем объеме диэлектрика.

Уменьшение напряжений в элементах переходов использованием метода ПАФОС достигается не только увеличением толщины площадок, но также за счет:

- увеличения жесткости контактных площадок введением слоев никеля;
- увеличения толщины металлизации стенок отверстия до 40-50 мкм без ухудшения точности сигнальных проводников, так как они формируются до металлизации отверстий;
- утапливания части КП в изоляцию, что уменьшает объем смолы под

- ними;
- электрохимического формования высокопластичных контактных площадок.

Автоматизация испытаний печатных плат

Испытания ПП на устойчивость к тепловым воздействиям проводятся с целью определения степени ухудшения качества межслойных переходов во время и после тепловых воздействий, аналогичных реальным воздействиям на платы в процессе изготовления, наладки и эксплуатации изделий. Другая цель таких испытаний – выявить дефекты, которые снижают надежность переходов в ПП, и определить конструктивно-технологические способы повышения надежности с учетом существующего уровня качества материалов и оборудования.

Объективность оценки качества металлизации межслойных переходов ПП в значительной степени определяет правильность оценки уровня надежности и экономические показатели производства.

Такие испытания необходимо проводить систематически в процессе изготовления высоконадежных ПП, а также как специальные испытания.

Увеличение объема и оперативности получения информации о качестве металлизированных переходов может дать автоматизация испытаний.

Наибольшая эффективность достигается автоматизацией контроля и регистрации состояния цепей с металлизированными переходами в течение всего периода испытаний, а также автоматизацией дозирования и смены видов воздействий на ПП, т.е. заданием программ испытаний.

Для контроля целостности цепей и регистрации разрывов непосредственно во время термовоздействий на ПП используется специальное устройство контроля цепей. Это устройство обеспечивает непрерывное наблюдение одновременно за 180 цепями ПП, помещенными в камерах тепла и холода, и позволяет регистрировать кратковременные и постоянные разрывы цепей. Разрывом считается увеличение сопротивления цепи более 230 Ом при постоянном разрыве или 120 Ом при кратковременном разрыве цепи.

Для автоматизации испытаний ПП на термоциклирование применяется установка, в которой используется терморadiационный нагрев плат и охлаждение потоком воздуха, продуваемого через рабочий объем камеры, что позволяет нагревать и охлаждать ПП в автоматическом режиме.

Платы могут испытываться в интервале температур от комнатной до +200°C. Время нагрева платы до предельной температуры 4 минуты, время охлаждения платы до комнатной температуры 7 минут. Циклы нагрева-охлаждения повторяются в зависимости от заданной программы, определяющей режим работы установки. Предусмотрено три режима работы:

- нагрев платы до установленной температуры и выдержка заданное время;

- нагрев платы до установленной температуры, выдержка заданное время и охлаждение до комнатной температуры;
- автоматическое отключение нагрева платы и включение охлаждения в момент появления в испытуемой цепи разрыва и включение нагрева в момент восстановления цепи при охлаждении.

Последний режим, названный условно «самоциклы», автоматически управляется характером поведения места отказа в цепи при термовоздействиях. Такое «самоциклирование» продолжается до тех пор, пока кратковременный разрыв связи, т.е. такой, когда связь восстанавливается (при определенной более низкой температуре), не перейдет в постоянный разрыв, т.е. когда связь не восстанавливается при охлаждении до комнатной температуры.

Изучение характера изменения сопротивления цепи с металлизированными переходами в режиме самоциклирования на большом числе плат позволяет выявить особенности механизма перемежающихся отказов сквозных и внутренних переходных отверстий, а также сделать вывод о возможности локализации кратковременных отказов с помощью устройства, работающего в режиме нагрева платы до температуры, несколько превышающей температуру разрыва цепи. Последняя определяется во время работы устройства в режиме самоциклов.

Применяется также установка испытания плат на термоциклирование, работающая на принципе конвекционного нагрева плат в воздушном пространстве между двумя горячими плитами, нагреваемыми распределенной системой электронагревателей. Охлаждение ПП осуществляется выдвиганием их из зоны нагрева и обдувом воздухом из окружающей среды. В блоке управления имеется счетчик термоциклов, регистратор текущей и заданной температур в камере. Блок регистрации разрывов в цепях испытуемых ПП контролирует появление отказов и фиксирует отдельно кратковременные и отдельно постоянные разрывы с указанием адреса цепи.

Устойчивость металлизированных переходов в ПП к воздействию термоударов эффективно исследовать на автоматизированной установке испытаний тепловыми ударами. Тепловые воздействия осуществляются с использованием иммерсионной теплопередачи в двух ваннах с кремнийорганической жидкостью.

Цикл испытаний заключается в автоматическом перемещении платы из ванны с холодной жидкостью и погружения ее в ванну с горячей жидкостью – термоудар нагрева, далее перемещение платы из горячей ванны и погружение ее в ванну с холодной жидкостью – термоудар охлаждения. Практически осуществляется пара термоударов. Температурный диапазон горячей ванны задается программно в диапазоне от +20°C до +280°C, а холодной ванны – 25±2°C. Время выдержки в горячей ванне можно задавать от 5 секунд до 35 секунд с интервалом 5 секунд, а в холодной ванне от 1 мин до 8 мин с интервалом 1 мин. Время автоматического переноса из горячей ванны в

холодную не более 16 секунд.

Надежность МПП

Для обеспечения высокой надежности печатных плат требуется особая программа обеспечения качества печатных связей как на этапе разработки конструкции и технологии, так и на этапе изготовления опытного образца и серийного производства. Необходимо постоянно проверять правильность принятого решения в части: плотности и геометрии проводников; плотности и геометрии переходов; размера ПП; количества слоев; рисунка экранов; уровня технологических проблем при выбранной плотности; требований к необходимым материалам и состояния их разработки и изготовления; возможности обеспечения; контроля качества ПП в процессе изготовления или при сборке и эксплуатации; возможности создания такой же системы межсоединений (с эквивалентными электрическими и топологическими свойствами) при другой, более простой, конструкции и технологии изготовления; сведение до минимума расхода материалов и количества операций при изготовлении; технической реализуемости закладываемых допусков; выполняемости и степени обоснованности отступлений от требований стандартов; компетентности требований нормативных документов; какими средствами или методами обеспечивать установленные показатели технологичности и надежности; степени сложности в освоении технологии изготовления новых конструктивных решений; использования новой технологии; технологической базы предыдущих устройств; этапности перехода на новую технологию; сравнение (процент выхода годных, процент отказов и т.д.) разных способов аппаратной реализации операций и определения степени критичности операций.

В конструкции связей используется много разнородных материалов (медь, стекло, смола), а в технологии изготовления много процессов. Многостороннее взаимодействие между материалами, процессами и внешними воздействиями влияет на надежность связей.

Обеспечение высокой надежности связей должно базироваться на определении физических и химических причин ненадежности. Требуется проводить анализ механизмов образования дефектов и отказов, их взаимовлияние и зависимость от конструкции, технологии, условий испытаний и эксплуатации.

По результатам анализа необходимо формировать конкретные конструктивно-технологические методы устранения или существенного уменьшения ненадежности. Сопоставление статистических данных о дефектах и отказах на разных этапах совершенствования конструкции, технологии и эксплуатации связей должно служить средством количественной оценки эффективности выбранных методов и средств нововведений.

Оценивать интенсивность отказов многослойной печатной платы с

внутренними металлизированными переходами (λ_{nn}) можно с помощью модели, представленной в виде:

$$\lambda_{nn} = N_{ск} \cdot \lambda_{ск} + N_{сн} \cdot \lambda_{сн} + N_{вн} \cdot \lambda_{вн} + N_{ки} \cdot \lambda_{ки} + N_{св} \cdot \lambda_{св},$$

где $N_{ск}$ – количество контактов с внутренними слоями в сквозных металлизированных отверстиях;

$N_{сн}$ – количество сквозных металлизированных отверстий;

$N_{вн}$ – количество переходов через внутренние металлизированные отверстия;

$N_{ки}$ – количество кольцевых изоляционных зазоров между слоями земли-питания и металлизацией сквозных отверстий;

$N_{св}$ – количество связей;

$\lambda_{ск}$ – интенсивность отказа соединения торца контактной площадки внутреннего слоя с металлизацией сквозных отверстий;

$\lambda_{сн}$ – интенсивность отказа перехода через металлизированное сквозное отверстие;

$\lambda_{вн}$ – интенсивность отказа перехода через металлизированное внутреннее отверстие;

$\lambda_{ки}$ – интенсивность отказа изоляции между проводником земли питания и металлизацией сквозного отверстия;

$\lambda_{св}$ – интенсивность отказа связи из-за искажения формы сигнала выше допустимого.

Основной вклад в надежность МПП вносят металлизированные переходы и изоляционные зазоры. В радиоэлектронных устройствах сложность печатных плат увеличивается. Соответственно растет число структурных элементов, определяющих надежность. Для сохранения надежности МПП на требуемом уровне необходимо значительно увеличивать надежность каждого структурного элемента.

Высокая надежность многослойных печатных плат может быть обеспечена путем: оптимизации конструкции; оптимизации процессов изготовления; жесткого контроля материалов и процессов; испытания тест-свидетелей (тест-плат, тест-купонов); достоверной корреляцией надежности плат и результатов испытаний тест-свидетелей.

Технологические маршруты изготовления печатных плат

Технологический маршрут изготовления ОПП субтрактивным негативным методом с использованием пленочного фоторезиста (Процесс 1)

Односторонний фольгированный диэлектрик	
Операция 1	Изготовление заготовок с базами
Операция 2	Подготовка поверхности заготовок
Операция 3	Получение рисунка схемы слоев из СПФ (наслаивание, (фотошаблон-экспонирование, проявление) негатив)
Операция 4	Контроль рисунка схемы
Операция 5	Травление меди в освобождениях рисунка фоторезиста
Операция 6	Удаление фоторезиста

Операция 34	Горячее лужение проводников
Операция 14	Сверление крепежных отверстий
Операция 7	Выходной контроль ОПП
ГОТОВЫЕ ОПП (без паяльной маски)	

Операция 14	Сверление крепежных отверстий
Операция 27	Подготовка поверхности ОПП под паяльную маску
Операция 28	Нанесение паяльной маски
Операция 29	Экспонирование паяльной маски (фотошаблон)
Операция 30	Проявление паяльной маски
Операция 31	Дублирование паяльной маски
Операция 33	Флюсование
Операция 34	Горячее лужение контактных площадок, не защищенных ПМ
Операция 10	Отмывка ОПП
Операция 36	Маркировка
Операция 38	Сушка
Операция 39	Выходной контроль ОПП
Операция 40	Упаковка ОПП
ГОТОВЫЕ ОПП С ПАЯЛЬНОЙ МАСКОЙ И МАРКИРОВКОЙ	

Технологический маршрут изготовления ОПП субтрактивным позитивным методом с использованием металлорезиста олово-свинец (Процесс 2)

Односторонний фольгированный диэлектрик	
Операция 1	Нарезка заготовок фольгированного диэлектрика
Операция 2	Пробивка базовых отверстий
Операция 3	Получение рисунка схемы слоев из СПФ (наслаивание, (фотошаблон-экспонирование, проявление) позитив)
Операция 4	Контроль и ретушь рисунка схемы
Операция 21	Электрохимическое осаждение сплава олово-свинец в окна фоторезиста
Операция 6	Удаление фоторезиста
Операция 22	Контроль, ретушь и подчистка по сплаву олово-свинец
Операция 23	Травление меди, не защищенной олово-свинцом
Операция 34	Оплавление сплава олово-свинец
Операция 9	Отмывка ОПП
Операция 37	Выходной визуальный контроль
Операция 38	Механическая обработка по контуру
Операция 40	Упаковка ОПП
ГОТОВЫЕ ОПП	

Технологический маршрут изготовления ОПП субтрактивным негативным методом с трафаретной печатью рисунка (Процесс 3)

Односторонний фольгированный диэлектрик	
Операция 1	Изготовление заготовок с базами
Операция 2	Подготовка поверхности заготовок
Операция 3 (трафарет)	Получение рисунка схемы слоев из трафаретной краски
Операция 4	Контроль и ретушь рисунка схемы
Операция 5	Травление меди в освобождениях рисунка, не защищенных трафаретной краской
Операция 6	Удаление трафаретной краски с заготовок
Операция 34	Горячее лужение проводников
Операция 7	Выходной контроль ОПП
ГОТОВЫЕ ОПП	

Технологический маршрут изготовления ДПП позитивным методом с металлорезистом олово-свинец (Процесс 1)

Фольгированный диэлектрик	
Операция 1	Нарезка заготовок фольгированного диэлектрика
Операция 14	Сверление базовых отверстий
Операция 14	Сверление металлизированных отверстий
Операция 15	Контроль качества и позиционной точности отверстий
Операция 16	Подготовка к металлизации
Операция 17	Химическая и предварительная электрохимическая металлизация всей поверхности и отверстий
Операция 18	Выравнивание микронеровностей поверхности после металлизации
Операция 2	Подготовка поверхности под СПФ
Операция 19	Контроль металлизации
Операция 3 (фотошаблон- позитив)	Получение рисунка схемы наружных слоев из СПФ
Операция 4	Контроль и ретушь
Операция 20	Электрохимическое меднение окон в СПФ
Операция 21	Электрохимическое осаждение сплава олово-свинец
Операция 6	Удаление СПФ
Операция 22	Контроль, ретушь, подчистка по сплаву олово-свинец
Операция 23	Травление меди, не защищенной олово-свинцом
Операция 24	Химическое удаление сплава олово-свинец
Операция 9	Отмывка ДПП
Операция 25	Контроль ДПП: визуальный и размерный
Операция 26	Контроль ДПП электрический
Операция 14	Сверление неметаллизированных отверстий
Операция 27	Подготовка поверхности ДПП под паяльную маску
Операция 28	Нанесение паяльной маски
Операция 29 (ФШ)	Экспонирование паяльной маски
Операция 30	Проявление паяльной маски
Операция 31	Дублирование паяльной маски, визуальный контроль
Операция 32	Термовакuumная обработка ДПП
Операция 33	Флюсование
Операция 34	Горячее лужение контактных площадок, не защищенных паяльной маской
Операция 10	Отмывка ДПП
Операция 35 (трафарет)	Маркировка

Операция 36	Сушка
Операция 37	Выходной визуальный контроль
Операция 38	Механическая обработка по контуру
Операция 39	Выходной электрический контроль
Операция 40	Оформление и упаковка ДПП
ГОТОВЫЕ ДПП	

***Технологический маршрут изготовления ДПП методом «тендинг»
(Процесс 2)***

Фольгированный диэлектрик	
Операция 1	Нарезка заготовок фольгированного диэлектрика
Операция 14	Сверление базовых отверстий
Операция 14	Сверление металлируемых отверстий
Операция 15	Контроль качества и позиционной точности отверстий
Операция 16	Подготовка к металлизации
Операция 17	Химическая и предварительная электрохимическая металлизация всей поверхности и отверстий
Операция 19	Контроль металлизации
Операция 20	Электрохимическое меднение всей поверхности и отверстий до установленной толщины
Операция 18	Выравнивание микронеровностей поверхности после металлизации
Операция 2	Подготовка поверхности под СПФ
Операция 3	Получение рисунка схемы наружных слоев из СПФ (фотошаблон-позитив) (наслаивание, экспонирование, проявление)
Операция 4	Контроль и ретушь
Операция 5	Травление меди в освобождениях рисунка СПФ
Операция 6	Удаление СПФ
Операция 7	Контроль и подчистка ДПП
Операция 9	Отмывка ДПП
Операция 25	Контроль ДПП: визуальный и размерный
Операция 26	Контроль ДПП электрический
Операция 14	Сверление неметаллируемых отверстий
Операция 27	Подготовка поверхности ДПП под паяльную маску
Операция 28	Нанесение паяльной маски
Операция 29	Экспонирование паяльной маски (ФШ)
Операция 30	Проявление паяльной маски
Операция 31	Дублирование паяльной маски, визуальный контроль

Операция 32	Термовакuumная обработка ДПП
Операция 33	Флюсование
Операция 34	Горячее лужение контактных площадок, не защищенных паяльной маской
Операция 10	Отмывка ДПП
Операция 35 (трафарет)	Маркировка
Операция 36	Сушка
Операция 37	Выходной визуальный контроль
Операция 38	Механическая обработка по контуру
Операция 39	Выходной электрический контроль
Операция 40	Оформление и упаковка ДПП
ГОТОВЫЕ ДПП	

Технологический маршрут изготовления ДПП без металлируемых переходов субтрактивным негативным методом (Процесс 3)

Фольгированный диэлектрик	
Операция 1	Нарезка заготовок фольгированного диэлектрика
Операция 2	Подготовка поверхности под СПФ
Операция 3 (фотошаблон-негатив)	Получение рисунка схемы слоев из СПФ (наслаивание, экспонирование проявление)
Операция 4	Контроль и ретушь рисунка схемы из СПФ
Операция 5	Травление меди в освобождениях рисунка СПФ
Операция 6	Удаление СПФ
Операция 7	Контроль и подчистка проводников
Операция 27	Подготовка поверхности ДПП под паяльную маску
Операция 28	Нанесение паяльной маски
Операция 29 (фотошаблон)	Экспонирование паяльной маски
Операция 30	Проявление паяльной маски
Операция 31	Дублирование паяльной маски, визуальный контроль
Операция 32	Термовакuumная обработка ДПП
Операция 33	Флюсование
Операция 34	Горячее лужение контактных площадок, не защищенных паяльной маской
Операция 10	Отмывка ДПП
Операция 35 (трафарет)	Маркировка
Операция 36	Сушка
Операция 37	Выходной визуальный контроль

Операция 38	Механическая обработка по контуру
Операция 39	Выходной электрический контроль
Операция 40	Оформление и упаковка ДПП
ГОТОВЫЕ ДПП	

Технологический маршрут изготовления слоев МПП субтрактивным негативным методом (Процесс 1)

Фольгированный диэлектрик	
Операция 1	Изготовление заготовок с базами
Операция 2	Подготовка поверхности заготовок под СПФ
Операция 3	Получение рисунка схемы слоев из СПФ (наслаивание, (фотошаблон-экспонирование, проявление) негатив)
Операция 4	Контроль и ретушь рисунка схемы из СПФ
Операция 5	Травление меди в освобождениях рисунка СПФ
Операция 6	Удаление СПФ с заготовок
Операция 7	Контроль и подчистка слоев
Операция 8	Оксидирование поверхности проводников на слоях
ГОТОВЫЕ СЛОИ	

Технологический маршрут изготовления МПП субтрактивным позитивным методом с металлорезистом олово-свинец (Процесс 2)

Операция 9	Комплектование слоев МПП для прессования
Операция 10	Финишная отмывка комплекта слоев
Операция 11	Прессование пакета МПП
Операция 12	Контроль спрессованной МПП
Операция 13	Снятие оксидного слоя
Операция 14	Сверление металлируемых отверстий
Операция 15	Контроль качества и позиционной точности отверстий
Операция 16	Подготовка к металлизации
Операция 17	Химическая и предварительная электрохимическая металлизация всей поверхности и отверстий
Операция 18	Выравнивание микронеровностей поверхности после металлизации
Операция 2	Подготовка поверхности под СПФ
Операция 19	Контроль металлизации
Операция 3	Получение рисунка схемы слоев из СПФ (наслаивание, (фотошаблон)экспонирование, проявление)
Операция 4	Контроль и ретушь
Операция 20	Электрохимическое меднение

Операция 21	Электрохимическое осаждение сплава олово-свинец в окна СПФ
Операция 6	Удаление СПФ
Операция 22	Контроль, ретушь и подчистка по сплаву олово-свинец
Операция 23	Травление меди, не защищенной сплавом олово-свинец
Операция 24	Химическое удаление сплава олово-свинец
Операция 10	Отмывка МПП
Операция 25	Контроль МПП: визуальный и размерный
Операция 26	Контроль МПП электрический
Операция 14	Сверление неметаллизируемых отверстий
Операция 27	Подготовка поверхности МПП под паяльную маску
Операция 28 (фотошаблон)	Нанесение паяльной маски
Операция 29	Экспонирование паяльной маски
Операция 30	Проявление паяльной маски
Операция 31	Дублирование паяльной маски и визуальный контроль
Операция 32	Термовакuumная обработка МПП
Операция 33	Флюсование
Операция 34	Горячее лужение монтажных площадок, не защищенных паяльной маской
Операция 10	Отмывка МПП
Операция 35 (трафарет)	Маркировка
Операция 36	Сушка
Операция 37	Выходной визуальный контроль
Операция 38	Механическая обработка по контуру
Операция 39	Выходной электрический контроль
Операция 40	Оформление и упаковка
ГОТОВЫЕ МПП	

Технологический маршрут изготовления слоев МПП полностью аддитивным методом (ПАФОС) (Процесс 3)

Склеивающая стеклоткань (препрег)	
Операция 2	Подготовка поверхности носителей (листов нержавеющей стали)
Операция 20	Электрохимическое осаждение сплошного тонкого слоя меди на поверхность носителей
Операция 3 (фотошаблон-позитив)	Получение рисунка схемы слоев из СПФ (наслаивание, экспонирование, проявление)
Операция 4	Контроль и ретушь рисунка схемы из СПФ

Операция 21	Электрохимическое осаждение тонкого слоя никеля в окна рисунка из СПФ
Операция 20	Электрохимическое осаждение слоя меди заданной толщины в окна рисунка из СПФ
Операция 11	Прессование носителей с проводниками с набором склеивающих прокладок (препрега)
Операция 38	Механическое расслаивание носителей от слоев с проводниками, утопленными в изоляцию
Операция 5	Травление сплошного тонкого слоя меди с поверхности слоев
ГОТОВЫЕ СЛОИ	

Список рекомендуемой литературы

1. Рыжонков, Д. И. Наноматериалы : учеб. пособие / Д. И. Рыжонков, В. В. Лёвина, Э. Л. Дзидзигури. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 365 с.
2. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.
3. Рамбиди, Н. Г. Нанотехнологии и молекулярные компьютеры / Н. Г. Рамбиди. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 256 с.
4. Нанотехнологическое общество России (НОР) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ntsr.info>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 03.02.2016).
5. Киреев, В. Ю. Введение в технологии микроэлектроники и нанотехнологии / В. Ю. Киреев. – М.: ФГУП «ЦНИИХМ», 2008. – 428 с.
6. Дубровский, В. Г. Теория формирования эпитаксиальных наноструктур / В. Г. Дубровский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 352 с.
7. Берикашвили, В. Ш. Твердотельная электроника и микроэлектроника : учеб. пособие / В. Ш. Берикашвили, С. А. Воробьев. – М.: Изд-во МГОУ, 2010. – 356 с.
8. Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл : пер. с англ. – изд. 2-е. – М.: БИНОМ, 2014. – 704 с.
9. Москатов, Е. А. Электронная техника. Начало / Е. А. Москатов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Таганрог, 2010. – 204 с.
10. Коваленко, А. А. Основы микроэлектроники : учеб. пособие / А. А. Коваленко, М. Д. Петропавловский. – 2-е изд. – М.: Академия, 2008. – 240 с.

11. Светцов, В. И. Физическая электроника и электронные приборы : учеб. пособие / В. И. Светцов, И. В. Холодков; Иван. гос. хим.–технол. ун-т. – Иваново, 2008. – 494 с. – ISBN 978-5-9616-0267-8.
12. Шишкин, Г. Г. Наноэлектроника. Элементы, приборы, устройства : учеб. пособие / Г. Г. Шишкин, И. М. Агеев. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 408 с. – ISBN 978-5-9963-0638-1.
13. Яфаров, Р. К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий / Р. К. Яфаров. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 216 с. – ISBN 978-5-9221-1150-8.
14. Нанотехнологии в электронике: учебник / под ред. члена-корреспондента РАН Ю. А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005. – 448 с. – ISBN 5-94836-059-8.
15. Высокие технологии в промышленности России. Монографический сборник на основе пленарных докладов IX Международной научно-технической конференции. 11-13 сентября 2003 г. / под ред. А. Ф. Беянина, М. И. Самойловича. – М.: Изд-во ОАО ЦНИТИ «Техномаш», 2003 – 270 с.

Учебное издание

Пивоваренок Сергей Александрович

Ситанов Дмитрий Вячеславович

ПРОЦЕССЫ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Учебное пособие

Редактор В.Л. Родичева

Подписано в печать 13.10.2016. Формат 60×84 1/16. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 14,65 Уч.-изд. л. 16,25 Тираж 80 экз. Заказ

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
химико-технологический университет»

Отпечатано на полиграфическом оборудовании
кафедры экономики и финансов ФГБОУ ВО «ИГХТУ»
153000, г. Иваново, пр. Шереметевский, 7