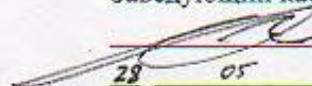


Белорусский национальный технический университет
Приборостроительный факультет
Кафедра «Микро- и нанотехника»

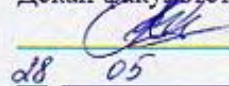
СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой

 Ю.М.Плескачевский
28 05 2018 г.

СОГЛАСОВАНО

Декан факультета

 А.И.Свистун
28 05 2018 г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО УЧЕБНОЙ
ДИСЦИПЛИНЕ

«Технологии нано- и микросистемной техники»

для специальности 1-38 01 04 «Микро- и наносистемная техника»

Составитель: Щербакова Елена Николаевна

Рассмотрено и утверждено на заседании Совета приборостроительного
факультета 28 мая 2018 года

Протокол № 9

ПЕРЕЧЕНЬ МАТЕРИАЛОВ

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) по учебной дисциплине «Технологии нано- и микросистемной техники» состоит из следующих разделов:

I. Теоретический раздел:

- курс лекций;

II. Практический раздел:

- перечень тем практических занятий;

III. Контроль знаний:

- перечень вопросов, выносимых на экзамен;

IV. Вспомогательный раздел:

- учебная программа для учреждения высшего образования.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели создания ЭУМК:

Целью ЭУМК по дисциплине «Технологии нано- и микросистемной техники» является формирование у студентов комплекса знаний по изучаемой учебной дисциплине, соответствующих академическим, социально-личностным и профессиональным компетенциям специалиста в рамках образовательного стандарта для специальности «Микро- и наносистемная техника».

Особенностями структурирования и подачи учебного материала являются изучение следующих теоретических материалов:

- описание базовых технологических процессов изготовления компонентов микро- и наносистемной техники,
- изучение основ эпитаксии, легирования, различных видов литографических процессов, тонкопленочных и вакуумных технологий, нелитографических методов формирования наноструктур.

Практическая часть состоит из перечня тем практических занятий и методических указаний по выполнению лабораторных работ. Раздел контроля знаний содержит вопросы к экзамену. Вспомогательный раздел содержит учебную программу по дисциплине «Технологии нано- и микросистемной техники».

Рекомендации по организации работы с ЭУМК: Материалы данного электронного учебного-методического комплекса можно использовать при выполнении лабораторных работ, выполнении курсовых проектов и

технологических частей дипломных проектов (работ), связанных с технологиями нано- и микросистемной техники.

СОДЕРЖАНИЕ

I. <u>ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</u>	6
<u>Введение</u>	6
<u>Раздел 1. Технологический процесс - основные понятия. Кремниевые подложки и их назначение</u>	7
<u>1.1 Технологический процесс - основные понятия. Основные технологические процессы производства изделий микро- и наносистемной техники.</u>	7
<u>1.2 Кремниевые подложки и их назначение. Особенности перехода с 300 мм на 450 мм кремниевые пластины</u>	9
<u>Раздел 2. Загрязнения подложек и методы очистки. Травление</u>	13
<u>2.1 Источники и виды загрязнений поверхности подложек и пластин</u>	13
<u>2.2 Классификация методов очистки пластин</u>	14
<u>2.2.1 Обезжиривание и промывание пластин</u>	14
<u>2.2.2 Химическое и электрохимическое травление</u>	15
<u>2.2.3 Способы интенсификации процессов жидкостной очистки</u>	18
<u>2.2.4. Методы сухой очистки</u>	21
<u>2.2.5 Виды загрязнений и способы их удаления</u>	24
<u>Раздел 3. Основные базовые технологические процессы технологии микро- и наносистемной техники</u>	25
<u>3.1 Сущность базовых технологических процессов</u>	25
<u>3.2 Последовательность формирования диффузионно-планарной структуры</u>	28
<u>Раздел 4. Основы базовых технологических процессов: травление, эпитаксия, термическое окисление, диффузия и ионная имплантация</u>	30
<u>4.1 Эпитаксия</u>	30
<u>4.1.1 Эпитаксия из газовой фазы</u>	31
<u>4.1.2 Жидкофазная эпитаксия</u>	34
<u>4.1.3 Молекулярно – лучевая эпитаксия</u>	34
<u>4.2 Термическое окисление</u>	40
<u>4.3 Ионная имплантация и диффузия примесей</u>	44
<u>4.3.1 Ионная имплантация. Профили распределения примеси при ионной имплантации. Дефекты при ионной имплантации и способы их устранения.</u>	45
<u>4.3.2 Термическая диффузия примесей</u>	48
<u>Раздел 5. Основные технологии напыления тонких пленок</u>	50
<u>5.1 Термовакuumное напыление</u>	50
<u>5.2 Катодное распыление</u>	51

<u>5.3 Трехэлектродная система распыления</u>	52
<u>5.4 Реактивное распыление</u>	54
<u>5.5 Магнетронное распыление</u>	54
<u>5.6 Ионно-лучевые методы получения тонких пленок</u>	56
<u>Раздел 6. Основы вакуумных технологий</u>	57
<u>6.1 Основы вакуумных технологий – понятие вакуума, степени вакуума. Число Кнудсена</u>	57
<u>6.2 Общая характеристика вакуумных насосов</u>	58
<u>6.3 Физические принципы объемной откачки (форвакуумные насосы)</u>	59
<u>6.4 Высоковакуумные насосы. Физические принципы, лежащие в основе работы турбомолекулярных, криогенных и диффузионных насосов</u>	62
<u>Раздел 7. Литографические и нелитографические методы в технологии микро- и наносистемной техники</u>	64
<u>7.1 Основы фотолитографии</u>	64
<u>7.1.1 Методы оптической литографии</u>	64
<u>7.1.2 Фоторезист. Негативные и позитивные фоторезисты</u>	66
<u>7.1.3 Методы нанесения фоторезистов</u>	67
<u>7.1.4 Основные параметры фоторезистов</u>	69
<u>7.2 Основы электронно-лучевой литографии</u>	71
<u>7.2.1 Проекционные системы</u>	71
<u>7.2.2 Сканирующая электронно-лучевая литография</u>	73
<u>7.3 Основы рентгеновской литографии</u>	75
<u>7.4 Основные нелитографические методы в технологии микро- и наносистемной техники</u>	76
<u>7.4.1 Наноимпринтинг</u>	76
<u>7.4.2 Методы, использующие сканирующие зонды</u>	77
<u>7.4.3 Методы, основанные на волоконных технологиях</u>	79
<u>ЛИТЕРАТУРА</u>	80
<u>II. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</u>	81
<u>III. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ</u>	82
<u>IV. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ</u>	85

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Введение

Учебная дисциплина базируется на знаниях, полученных при изучении таких дисциплин как: «Математика», «Физика», «Физическая химия», «Технология материалов и компонентов электронной техники» и др. Знания и умения, полученные студентами при изучении данной дисциплины, необходимы для освоения последующих специальных дисциплин и дисциплин специализаций, таких как «Физика нано- и микросистем», «Информационные технологии нано- и микросистемной техники», «Техника наноконтроля».

В результате изучения учебной дисциплины «Технологии нано- и микросистемной техники» Вы должны освоить:

- базовые технологические процессы изготовления компонентов микро- и наносистемной техники;
- литографические и нелитографические методы формирования поверхностных периодических наноструктур;
- технологию самоорганизованных, имплантированных, наноразмерных структур в полупроводниках;
- технологии нанокомпозитов и нанокерамики.

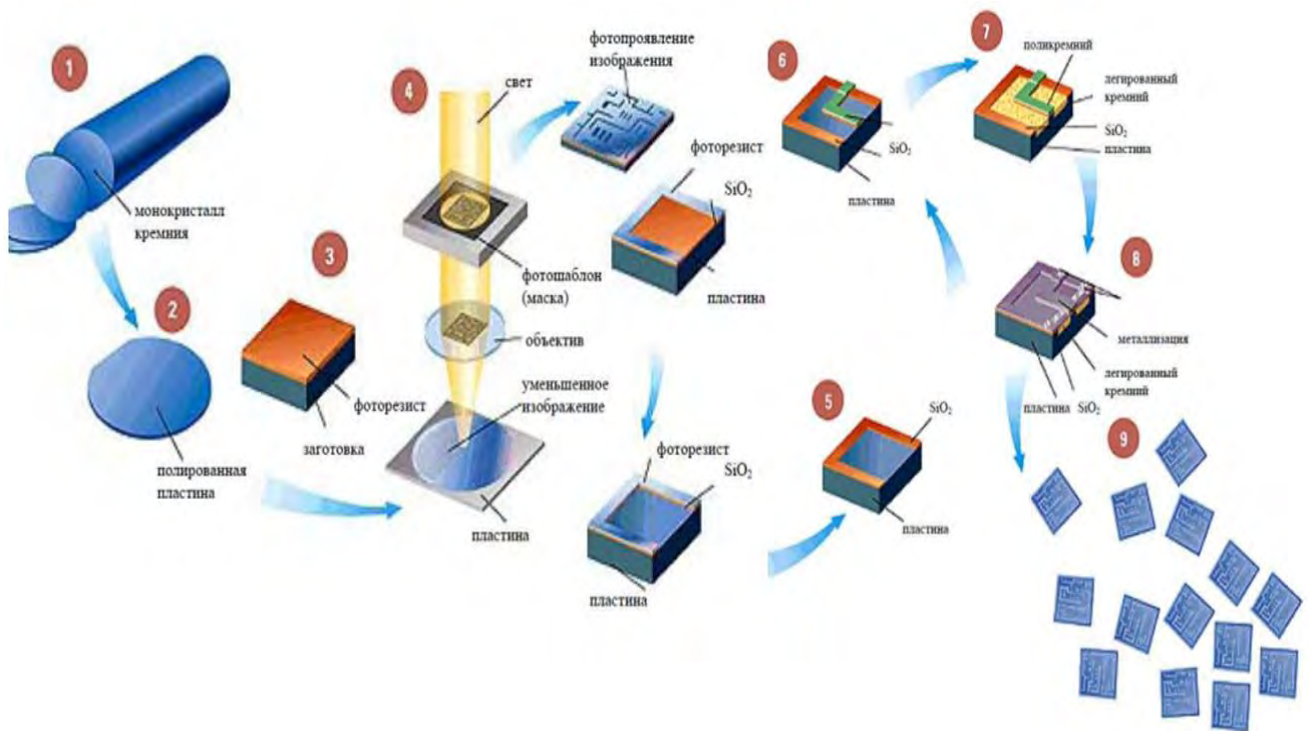
Раздел 1. Технологический процесс - основные понятия. Кремниевые подложки и их назначение

1.1 Технологический процесс - основные понятия. Основные технологические процессы производства изделий микро- и наносистемной техники.

Под технологическим процессом понимается часть производственного процесса, во время которого происходит непосредственное, изменение состояния продукта производства (материала, детали, электронного прибора). Под производственным процессом понимается группа технологических процессов, участвующих в изготовлении продукта, группа заготовительных операций, процесс сборки, транспортировка.

Технологии микро- и наносистемной техники базируются на технологиях микроэлектроники. К основным технологическим процессам производства изделий микроэлектроники относятся:

- 1) получение материалов;
- 2) подготовка материалов к операциям (очистка материалов, газов и воды);
- 3) перевод материалов в жидкую, газовую или ионно-плазменную фазу (испарение);
- 4) формирование пленок и покрытий из жидкой, газовой или ионно-плазменной фаз;
- 5) травление материалов;
- 6) литографические процессы;
- 7) формирование газовой среды, в которой проводится процесс.



1,2 - изготовление пластин из монокристаллического кремния; 3 – нанесение фоторезиста; 4 – фотолитография; 5,6,7,8 – легирование, окисление, металлизация; 9 – тестирование, разрезание пластины на отдельные элементы.

Рисунок 1.1 – Базовые технологические процессы микроэлектроники

Типовой технологический процесс предполагает следующие операции:

- 1) составление последовательности технологических операций;
- 2) выбор оборудования и инструментов;
- 3) конструкторский анализ чертежей на технологичность, условие сборки, ремонтоспособность;
- 4) разработка маршрута обработки на отдельных видах оборудования;
- 5) анализ кадрового состава;
- 6) составление отчетных документов с соблюдением ГОСТ.

Для организации и оптимизации технологического процесса большое значение имеет его технологический режим. Технологическим режимом называют совокупность основных факторов, влияющих на скорость процесса, выход и качество. Для большинства технологических процессов производства элементов микро- и наносистемной техники основными параметрами режима являются температура, давление, способ подвода и перемешивание реагентов и др. Параметры технологического режима определяют принципы конструирования соответствующих реакторов. Оптимальному значению

параметров технологического режима соответствуют максимальные производительность аппаратов и производительность труда персонала, обслуживающего процесс.

По характеру протекания во времени технологические процессы подразделяют на периодические, непрерывные и комбинированные.

Периодический процесс характеризуется единством места протекания отдельных его стадий и неустановившимся состоянием во времени. В периодических процессах конечный продукт выгружают полностью из аппарата или частично через определенные промежутки времени. После разгрузки аппарата в него загружают новую порцию исходных материалов и производственный цикл повторяется.

Непрерывный процесс характеризуется единством времени протекания всех его стадий, установившимся состоянием и непрерывным отбором конечного продукта.

Комбинированный процесс представляет собой любой непрерывный процесс, отдельные стадии которого проводятся периодически, либо такой процесс, одна или несколько стадий которого проводятся непрерывно.

Непрерывные процессы имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с периодическими и комбинированными. В связи с этим в настоящее время во всех отраслях техники стремятся перейти от периодических к непрерывным производственным процессам.

1.2 Кремниевые подложки и их назначение. Особенности перехода с 300 мм на 450 мм кремниевые пластины

В технологии МНТ подложки (рисунок 1.2) выполняют две функции:

- а) являются основанием, на поверхности или в приповерхностном слое которого по заданному топологическому рисунку формируют структуры, элементов МНТ (в том числе ИМС);
- б) являются элементом конструкции, обеспечивающим практическое применение элементов МНТ в корпусном или бескорпусном исполнении.



Рисунок 1.2 – Кремниевые подложки

Подложки классифицируют как по структурным признакам, так и по назначению. По структурным признакам подложки подразделяют на аморфные, поликристаллические и монокристаллические, а по назначению - на подложки для полупроводниковых, пленочных, гибридных ИМС и микро- и наносборок.

Монокристаллические пластины из кремния составляют основу для изготовления многих элементов НМТ, полупроводниковых ИМС различного конструктивно-технологического исполнения и функционального назначения. Подготовка пластин, получаемых из слитков монокристаллического кремния, является одним из важнейших этапов производства и включает в себя следующие операции:

- 1) ориентацию слитков по кристаллографическим осям;
- 2) резку слитков на пластины;
- 3) шлифование;
- 4) полирование;
- 5) травление
- 6) очистку поверхностей от загрязнений различных типов, приобретённых на предыдущих этапах обработки.

При переходе с 300 мм на 450 мм кремниевые пластины, площадь кремниевой подложки увеличивается в целых 2.25 раза. Кроме того, можно разместить даже больше чипов, так как в окружность с большим радиусом прямоугольники вписываются с большей эффективностью. Говоря по-простому, если рисовать круг квадратиками, то круг будет тем «круглее», чем он больше или квадратика меньше. Возьмём к примеру ядро Tahiti XT (рисунок

1.3) с площадью 352 мм^2 , стоящего в основе видеокарт HD 7970. При условии что чипы квадратные, на 300 мм подложке удастся разместить около 160 чипов, а на 450 мм подложке уже 386. Что в 2.41 раза больше. Разумеется, прибавка будет варьироваться в зависимости от размеров чипа.

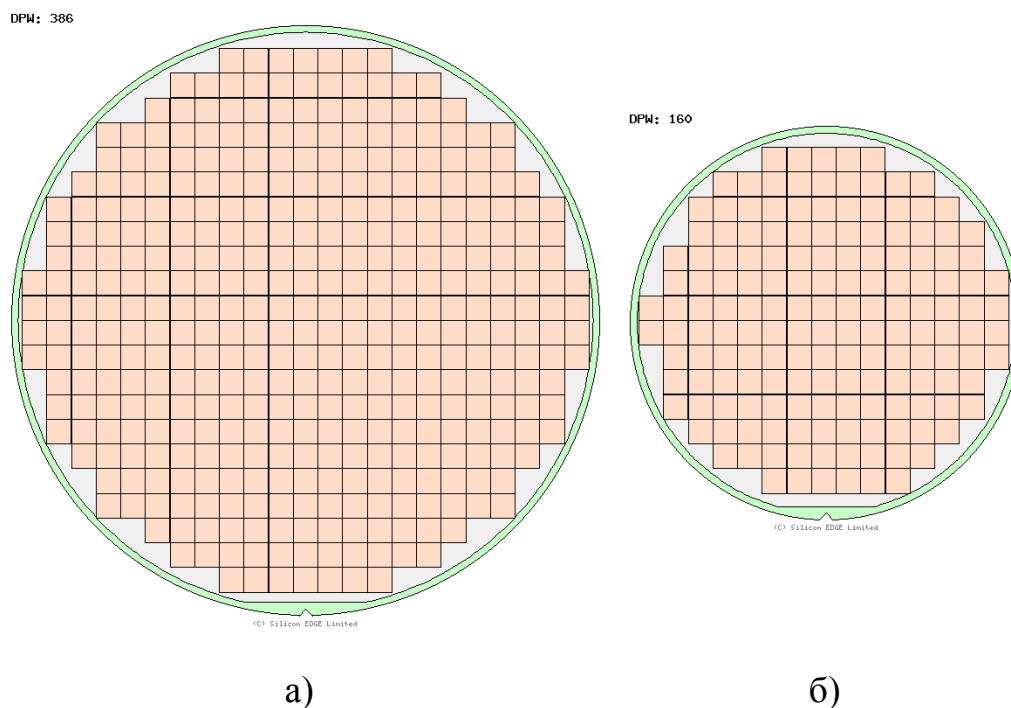


Рисунок 1.3 – Ядро Tahiti XT: а – ядро Tahiti XT с 450 мм подложкой; б – ядро Tahiti XT с 300 мм подложкой

Технические трудности

Вес выращенного кристалла увеличивается в 3 раза, до одной тонны. Возникает проблема при вертикальном подвешивании кристалла за узкое горлышко, толщиной в несколько мм, при процессе выращивания. Затравочный кристалл сам по себе не сможет выдержать вес 450 мм кристалла. Нужен дополнительный способ поддержания кристалла.

Любая внешняя вибрация (например, землетрясение) способна вызвать изменение в пространственной решётке кристалла. Если такое происходит, кристалл приходится полностью переплавить и выращивание начинается с самого начала. Это отнимает значительное количество времени (до месяца) и тем самым увеличивает стоимость производства. Так, последствия землетрясения в Японии в 2011 году снизили мировой выпуск монокристаллов кремния на 24.5%.

Также кварцевые тигли для плавки поликристаллического кремния должны быть большими и должны выдерживать вдвое больше времени, требуемое для производства, чем используемые для выращивания 300 мм кристаллов. Если для выращивания 300 мм кристаллов используются тигли размером 81,3 см, то для 450 мм кристаллов необходимы тигли диаметром до 111 см. Чтобы выдерживать такое длительное время выращивания, качество тиглей должно быть также улучшено.

Время на охлаждение может увеличиться до 4-х раз. Тепловое прошлое, во время производства кристалла, влияет на количество, размер и распределение дефектов в виде примесей. В отличие от смещений, такие дефекты обычно присутствуют. И хотя они не обязательно приводят к отбраковке кристалла, зато могут сказаться на работоспособности конечных чипов. Поэтому нужно точно контролировать процесс, чтобы минимизировать их появление. Из-за размеров 450 мм кристалла, охлаждаться он будет медленнее, что подвергает его большему перепаду температур и влияет на появление дефектов. Для этого необходим инновационный процесс охлаждения.

Раздел 2. Загрязнения подложек и методы очистки. Травление

2.1 Источники и виды загрязнений поверхности подложек и пластин

Получить идеально чистую поверхность (без посторонних примесей) практически невозможно. Поэтому применяемое в технике понятие «чистая поверхность» имеет относительный характер. Технологически чистой считают поверхность, которая имеет концентрацию примесей, не препятствующую воспроизводимому получению заданных значений и стабильности параметров элементов НМТ. Для обеспечения эффективной очистки с целью получения технологически чистой поверхности пластин (подложек) необходимо знать источник и вид загрязнения, характер его поведения на поверхности, методы удаления.

Основными источниками загрязнений поверхности пластин и подложек являются:

- 1) абразивные и клеящие материалы;
- 2) кремниевая пыль при механической обработке;
- 3) пыль в производственных помещениях;
- 4) предметы, с которыми соприкасаются пластины и подложки (оборудование, инструмент, оснастка, технологическая тара);
- 5) технологические среды;
- 6) органические и неорганические реагенты;
- 7) вода;
- 8) одежда и открытые участки тела операторов и др.

Возможные загрязнения на поверхности пластин и подложек классифицируют по их физико-химическим свойствам, так как они определяют выбор методов удаления загрязнений. Наиболее распространенными являются загрязнения следующих видов:

- физические загрязнения - пылинки, ворсинки, абразивные материалы, силикаты, кремниевая пыль и другие посторонние частицы, химически не связанные с поверхностью пластин и подложек.
- загрязнения, химически связанные с поверхностью пластин и подложек - оксиды, нитриды и другие соединения.
- органические загрязнения - неполярные жиры, масла, силиконы и другие неионные примеси.
- растворимые в воде полярные загрязнения - соли, кислоты, остатки травителей, флюсы и пр.
- газы, адсорбированные поверхностью пластин и подложек.

2.2 Классификация методов очистки пластин

Для удаления загрязнений используют различные методы, на физических принципах которых разрабатывают процессы очистки. По механизму протекания процессов все методы очистки классифицируют на физические и химические, а по применяемым средствам - на жидкостные и сухие (рисунок 2.1). В основу каждого способа очистки положен один из трех методов удаления загрязнений с поверхности:

- 1) механическое удаление частиц загрязнителя потоком жидкости или газа;
- 2) растворение в воде;
- 3) химическая реакция.

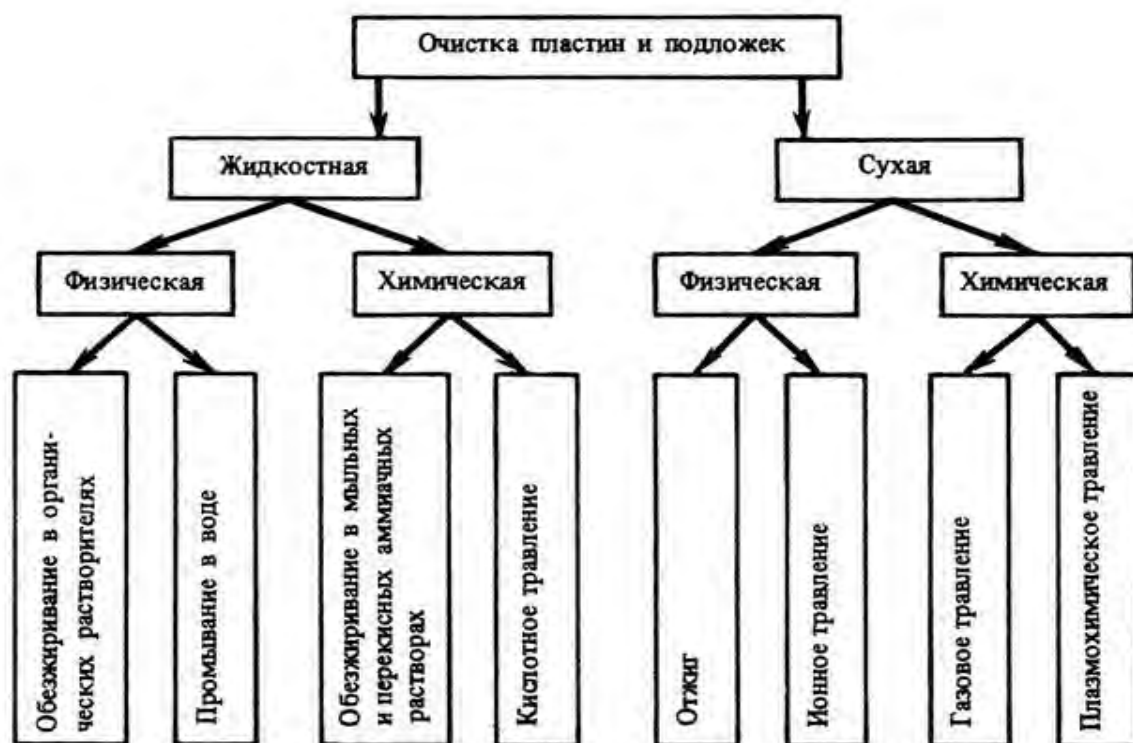


Рисунок 2.1 - Классификация способов очистки по применяемым средствам

2.2.1 Обезжиривание и промывание пластин

Обезжиривание бывает физическим и химическим. Физическое обезжиривание основано на отрыве молекул жира от поверхности при ее взаимодействии с органическими растворителями. Отрыв вызывается собственными колебаниями молекул жира и притяжением их молекулами растворителя. Для этого пластины (подложки) погружают в резервуар (ванну) с

растворителем. После отрыва молекулы жира равномерно распределяются по всему объему ванны, что приводит к загрязнению растворителя и обратному процессу - адсорбции молекул жира очищенной поверхностью. Во избежание последнего требуется постоянное освежение растворителя. В качестве растворителей наиболее часто применяют четыреххлористый углерод, бензол, толуол, изопропиловый спирт, фреон и др., в которых эффективно растворяется большинство жировых загрязнений. Определяющими параметрами процесса являются температура и время. Растворимость жиров увеличивается с повышением температуры. Поэтому обезжиривание осуществляют в горячих или кипящих растворителях. Недостатки физического обезжиривания: многократная очистка, большой расход, высокая стоимость и токсичность большинства растворителей.

Химическое обезжиривание основано на разрушении молекул жира растворителями, не воздействующими на материал пластины (подложки). Его отличительной особенностью является отсутствие вероятности повторного загрязнения пластин. Для химического обезжиривания кремниевых пластин наиболее часто применяют горячий (75-80°C) перекисно-аммиачный раствор (водный раствор смеси пергидроля и щелочи), который удаляет все жиры.

На различных этапах изготовления компонентов НМТ производят неоднократно промывание пластин и подложек. Для промывания применяют дистиллированную, бидистиллированную и деионизованную воду. Промывание обязательно производится после обезжиривания и травления. Его назначение - удаление остатков загрязнений, продуктов реакции и остатков реагентов.

2.2.2 Химическое и электрохимическое травление

Процесс травления пластин состоит в растворении их поверхности при взаимодействии с соответствующими химическими реагентами (щелочами, кислотами, их смесями и солями). В результате удаляются приповерхностный слой и имеющиеся на поверхности загрязнения. Травление бывает химическим и электрохимическим.

Процесс химического травления состоит из пяти стадий:

- 1) диффузии реагента к поверхности;
- 2) адсорбции реагента;
- 3) поверхностной химической реакции;
- 4) десорбции продуктов реакции;
- 5) диффузии продуктов реакции от поверхности.

Скорость всего процесса определяется скоростью наиболее медленной

стадии.

При травлении кремния контролирующими стадиями могут быть либо диффузия реагента к поверхности, либо поверхностная химическая реакция, что определяется видом травителя и энергией активации стадий процесса. Травители, для которых контролирующей стадией является диффузия, называются полирующими. Скорость травления $V_{тр}$ в полирующих травителях определяется скоростью диффузии реагента V_d и зависит от градиента его концентрации:

$$V_{тр} = V_d = D(N_{об} - N_{пов})/\delta$$

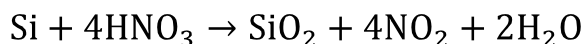
где D - коэффициент диффузии реагента, зависящий от природы и энергии активации молекул реагента;

$N_{об}$ и $N_{пов}$ - концентрация реагента в объеме и на поверхности;

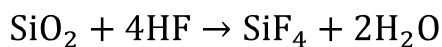
δ - толщина приповерхностного слоя травителя, в котором существует градиент концентрации.

При этом скорость травления нечувствительна к физическим и химическим неоднородностям поверхности, слабо зависит от температуры. Вследствие более высокого градиента концентрации выступы на поверхности травятся быстрее впадин. Поэтому полирующие травители хорошо сглаживают шероховатости, выравнивая микрорельеф. Типичными полирующими травителями для кремниевых пластин являются смеси азотной и фтористоводородной (плавиковой) кислот.

Существуют две теории саморастворения кремния в травителях: химическая и электрохимическая. Согласно химической теории поверхностные химические реакции при полирующем травлении протекают в два этапа: окисление поверхностного слоя и перевод оксида в растворимую соль. Роль окислителя выполняет азотная кислота:



Фтористо-водородная кислота является комплексообразователем, который переводит оксид кремния в тетрафторид:



В соответствии с электрохимической теорией взаимодействие между полупроводником и травителем обусловлено тем, что на поверхности пластины

при погружении ее в травитель существуют анодные и катодные микроучастки, между которыми возникают локальные токи. На анодных участках происходит окисление кремния с последующим растворением оксида и образованием кремний-фтористоводородной кислоты, на катодных - восстановление окислителя (азотной кислоты). В процессе травления микроаноды и микрокатоды непрерывно меняются местами. Очистке поверхности полупроводниковых пластин путем их обработки в полирующих травителях предшествует обязательное обезжиривание поверхности.

Для ряда травителей энергия активации химической реакции на порядок и более превышает энергию активации, определяющую скорость диффузии реагента. В этом случае скорость травления определяется скоростью химической реакции:

$$V_{\text{тр}} = (N_A)^a (N_B)^b \exp - \frac{\Delta E_a}{RT}$$

где N_A и N_B - концентрации реагирующих веществ;

R – универсальная газовая постоянная;

a и b – показатели, численно равные коэффициентам в уравнении химической реакции.

Поскольку энергия активации химической реакции зависит от неоднородности поверхности, скорость травления чувствительна к состоянию поверхности. Так как различные кристаллографические плоскости структуры кремния имеют разное значение энергии активации химической реакции, то скорость травления зависит от ориентации пластин, а также от температуры.

Травители, для которых контролирующей стадией является химическая реакция, называются селективными. В качестве селективных травителей пластин кремния используют водные растворы щелочей (например, NaOH , KOH). Для селективных травителей характерная разница скоростей травления в различных кристаллографических направлениях достигает одного порядка и более. Так, для щелочных травителей изменение скорости травления соответствует схеме $(100) > (110) > (111)$. Травление с большой разницей скоростей травления в различных кристаллографических направлениях называют анизотропным.

Электрохимическое травление основано на химических превращениях, которые происходят при электролизе. Для этого полупроводниковую пластину (анод) и металлический электрод (катод) помещают в электролит, через

который пропускают электрический ток. Процесс является окислительно-восстановительной реакцией, состоящей из анодного окисления (растворения) и катодного восстановления. Кинетика анодного растворения определяется концентрацией дырок, генерируемых на поверхности полупроводниковой пластины.

Электрохимическое травление кремниевых пластин производят в растворах, содержащих плавиковую кислоту, при возрастающей плотности тока (рис.2.2.).

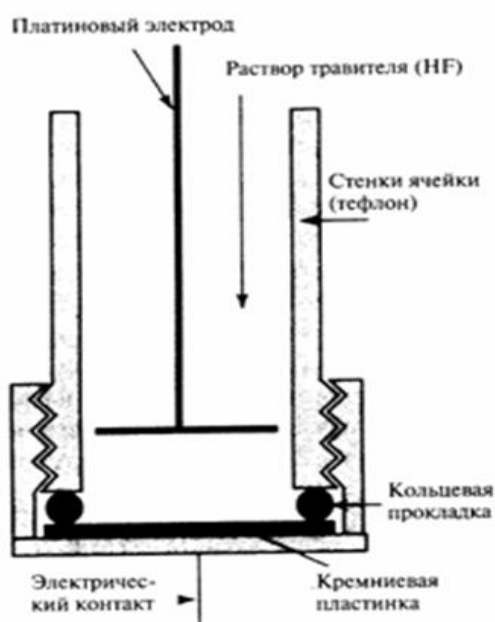
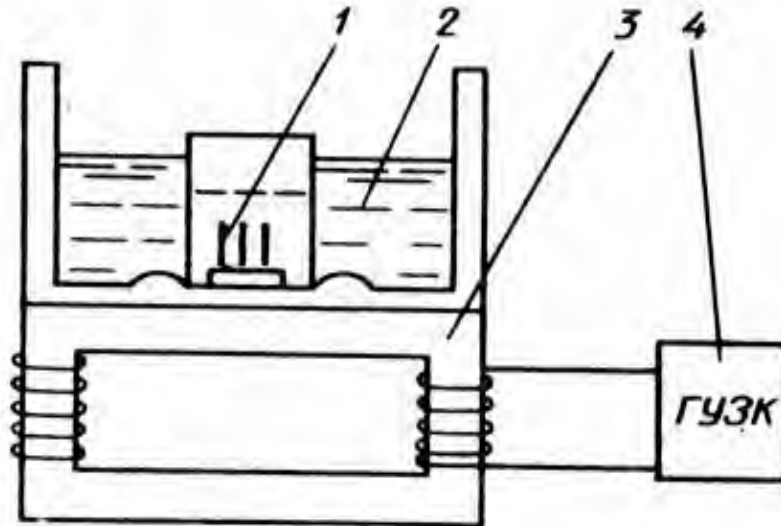


Рисунок 2.2 - Ячейка для травления кремниевой пластинки в растворе плавиковой кислоты (HF)

2.2.3 Способы интенсификации процессов жидкостной очистки

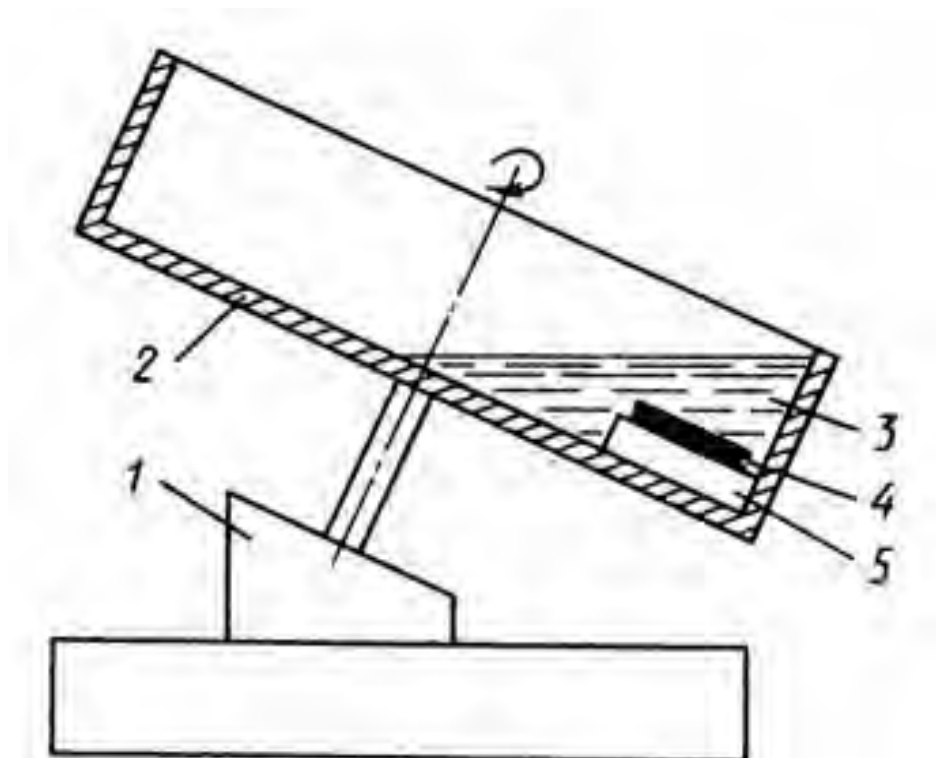
Для ускорения наиболее медленных стадий процессов очистки с целью повышения качества очистки и производительности процессов используют различные способы их интенсификации, которые достигаются применением физических, химических и комбинированных средств. К физическим средствам относятся нагрев, кипячение, вибрация, обработка струёй, гидроциркуляцией, протоком, гидромеханическая обработка, центрифугирование, ультразвуковая обработка. К химическим средствам относятся поверхностно-активные вещества, комплексообразователи, катализаторы. Комбинированные средства основаны на использовании физических и химических средств.

Наиболее распространенными и эффективными способами жидкостной обработки в промышленных условиях являются ультразвуковая очистка в растворителях (рисунок 2.3), химико-динамическое травление (рисунок 2.4), анодно-механическое травление (рисунок 2.5).



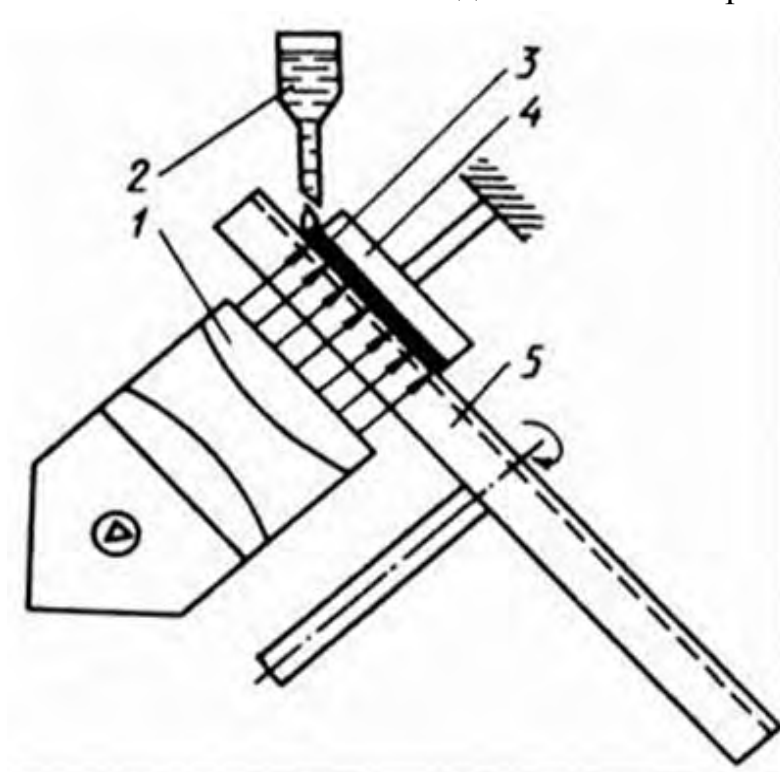
1 - пластины кремния; 2 - ванна с водой (эмульсией); 3 - блок вибрации;
4 - генератор.

Рисунок 2.3 - Установка ультразвуковой очистки кремния



1 – привод; 2 – барабан; 3 – травитель; 4 – кремниевые пластины;

Рисунок 2.4 - Установка химико-динамического травления



1 – лампа; 2 – электролит; 3 – пластины кремния; 4 – анод; 5 – катодный диск.

Рисунок 2.5 – Установка анодно-механического травления

При ультразвуковой очистке механические вибрации способствуют перемешиванию растворителя и тем самым ускоряют процесс. Принцип химико-динамического травления заключается в интенсивном перемешивании травителя непосредственно над поверхностью пластин. При вращении приводом 1 фторопластового барабана 2 травитель 3 омывает пластины 4, закрепленные на специальном диске 5, чем достигается хорошее перемешивание травителя и равномерное травление (рис.2.3).

В основу анодно-механического травления положено электрохимическое травление, сопровождаемое механическим воздействием. Электролит 2 подается на освещенные мощной лампой 1 (для генерации дырок) пластины 3, которые предварительно закрепляются на аноде 4, и соприкасаются с вращающимся катодным диском 5, содержащим радиальные канавки. При этом скорость электрополировки достигает 400 нм/с. Особый интерес с точки зрения производительности и качества очистки представляет способ, основанный на возникновении кавитации в пограничном слое очищаемой поверхности. Условия кавитации создают механическим путем (центрифугированием), а в

качестве растворителя используют дистиллированную воду с растворенным кислородом.

2.2.4 Методы сухой очистки

Термообработка

Сущность термообработки состоит в нагреве пластины или подложки до температуры, при которой происходят:

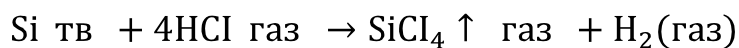
- 1) удаление адсорбированных поверхностью загрязнений,
- 2) разложение поверхностных загрязнений
- 3) испарение летучих соединений.

Отжиг осуществляют в вакуумных установках непосредственно перед проведением основных операций. Эффективность очистки зависит от температуры, максимальное значение которой ограничено температурой плавления очищаемых материалов и процессами диффузии примесей.

Газовое травление

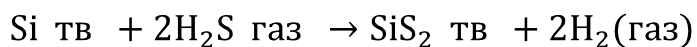
Сущность газового травления заключается в химическом взаимодействии материала пластин с газообразными веществами и образовании при этом легко улетучиваемых соединений. В процессе газового травления загрязнения удаляются вместе со стравливаемым приповерхностным слоем пластин. Газовое травление как метод окончательной очистки применяют в первую очередь непосредственно перед теми технологическими процессами, в которых определяющую роль играет структура поверхностного слоя (например, перед эпитаксиальным наращиванием). В качестве травителей используют смеси водорода или гелия с галогенами (фтор, хлор, бром), галогеноводородами (HBr, HCl), сероводородом. Молярное содержание этих веществ в водороде или гелии может изменяться от десятых долей процента до единиц процентов. Очистку осуществляют при температурах 800-1300°C в установках термического окисления либо непосредственно в реакторах эпитаксиального наращивания.

Наибольшее распространение получило травление кремниевых пластин хлористым водородом при температурах 1150-1250°C, при этом происходит реакция:



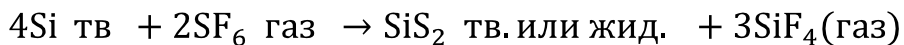
Скорость травления зависит от температуры и концентрации HCl в водороде. Аналогично происходит травление кремния в HBr.

Травление кремния в парах сероводорода происходит по реакции:



При этом получаются большие скорости травления (до 15 мкм/мин). Недостаток - сероводород токсичен.

Гексафторид серы не токсичен и обеспечивает хорошее качество поверхности при травлении кремния. Травление кремния сопровождается реакцией:



Газовое травление обеспечивает получение более чистых поверхностей по сравнению с жидкостной, обработкой. Однако его применение ограничено из-за высоких температур процессов и необходимости использования газов особой чистоты.

Ионное и плазмохимическое травление

Ионное травление - процесс удаления загрязнений вместе с распыляемым в вакууме поверхностным слоем обрабатываемой поверхности при ее бомбардировке ускоренными ионами инертного газа.

Если во время столкновения энергия, передаваемая атому, превышает энергию химической связи атома в решетке, а импульс, сообщаемый атому, направлен наружу от поверхности, то происходит смещение атомов, их отрыв от поверхности - распыление. Для реализации этого процесса требуются определенные вакуумные условия, а ионы должны обладать определенными значениями энергий, достаточными для распыления материалов.

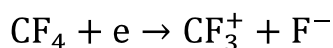
Разновидностью ионного травления является ионно-химическое (реактивное) травление, основанное на введении в плазму химически активного газа, обычно кислорода. При этом изменяется скорость травления вследствие химического взаимодействия между подложкой и добавленным газом.

В отличие от ионного плазмохимическое травление основано на разрушении обрабатываемого материала ионами активных газов,

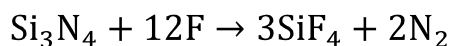
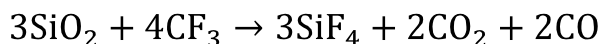
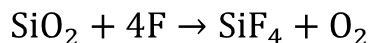
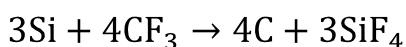
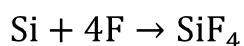
образующимися в плазме газового разряда и вступающими в химическую реакцию с атомами материала при бомбардировке поверхности пластин или подложек. При этом молекулы газа в разряде распадаются на реакционно-способные частицы - электроны, ионы и свободные радикалы, химически взаимодействующие с травящейся поверхностью. В результате химических реакций образуются летучие соединения.

Для травления кремния и его соединений (оксида и нитрида кремния) наиболее часто используют высокочастотную плазму тетрафторида углерода CF_4 .

При взаимодействии с электронами плазмы происходит следующая реакция:



Ионы фтора, а в ряде случаев и радикал CF_3 активно взаимодействуют с кремнием, образуя летучее соединение SiF_4 . Уравнения, характеризующие химические реакции травления кремния, оксида и нитрида кремния в плазме, имеют вид:



Концентрация C_F обуславливается скоростью генерации атомов, что определяется конструкцией и мощностью реактора, а также временем жизни частиц в реакторе, которое зависит от скорости газового потока, давления и условной рекомбинации частиц. Характерно, что частицы, участвующие в травлении, травят различные материалы с разной скоростью. На этом основано свойство плазмохимического травления. Скорость травления определяется концентрацией атомов фтора и постоянной скорости химической реакции α :

$$V_{\text{тр}} = \alpha \cdot \text{C}_\text{F}$$

2.2.5 Виды загрязнений и способы их удаления

Таблица 2.1 – Виды загрязнений и способы очистки

Виды загрязнений	Способы очистки
Физические включения (пылинки, пух, небольшие частицы полупроводника, металла, абразива)	Растворение и одновременное ультразвуковое перемешивание
Загрязнения ионами (остатки кислот, осадки, получаемые при электролитическом покрытии, ионы металлов)	Промывка в деионизированной или дистиллированной воде до установления постоянного сопротивления. Промывка в кислотах для удаления адсорбированных ионов. Ионная очистка
Минеральные жиры и органические материалы	Ультразвуковая промывка в нагретом органическом растворителе. Ионная очистка
Сложные химические включения (полярный органический материал, окислы, сернистые соединения)	Травление кислотами. Промывка кремниевых пластин в метиловом спирте
Загрязнения парами	Ионная очистка. Вакуумный отжиг. Термическое травление. Обработка в кислотах

Раздел 3. Основные базовые технологические процессы технологии микро- и наносистемной техники

3.1 Сущность базовых технологических процессов

Термическая диффузия примесей: внедрение атомов легирующего элемента в кристаллическую решетку полупроводника для образования области с противоположным по отношению к исходному материалу типом проводимости (рисунки 3.1,3.2)

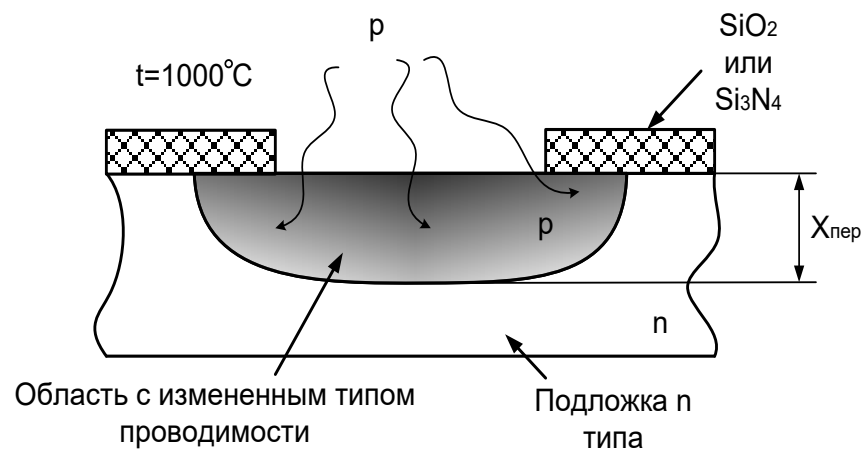


Рисунок 3.1 – Термическая диффузия примесей

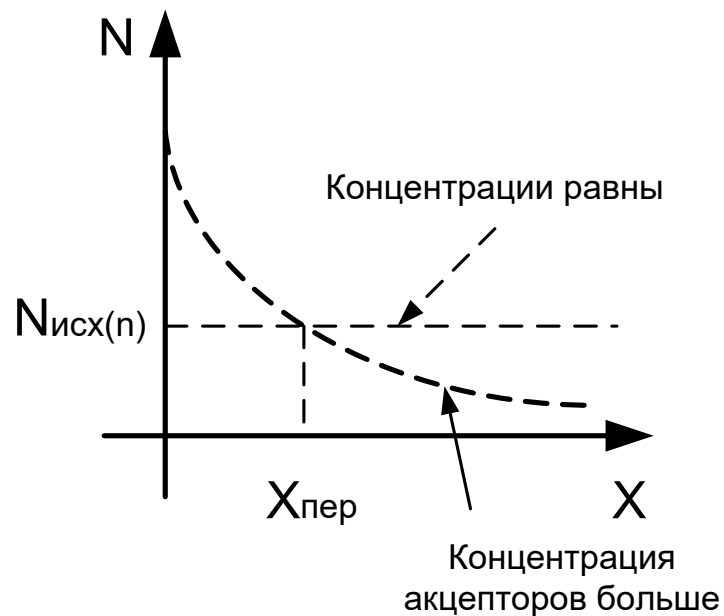


Рисунок 3.2 – Профиль распределения примесей при диффузии

Ионное легирование: внедрение примесей в поверхностный слой пластины или эпитаксиальной пленки путем бомбардировки ионами примесей (рисунок 3.3 и 3.4).

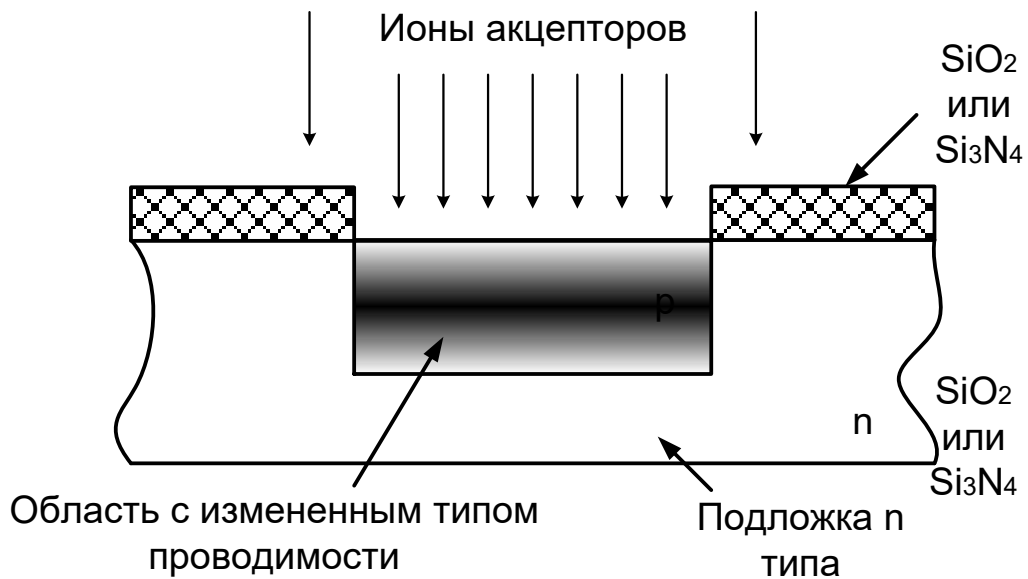


Рисунок 3.4 – Ионное легирование

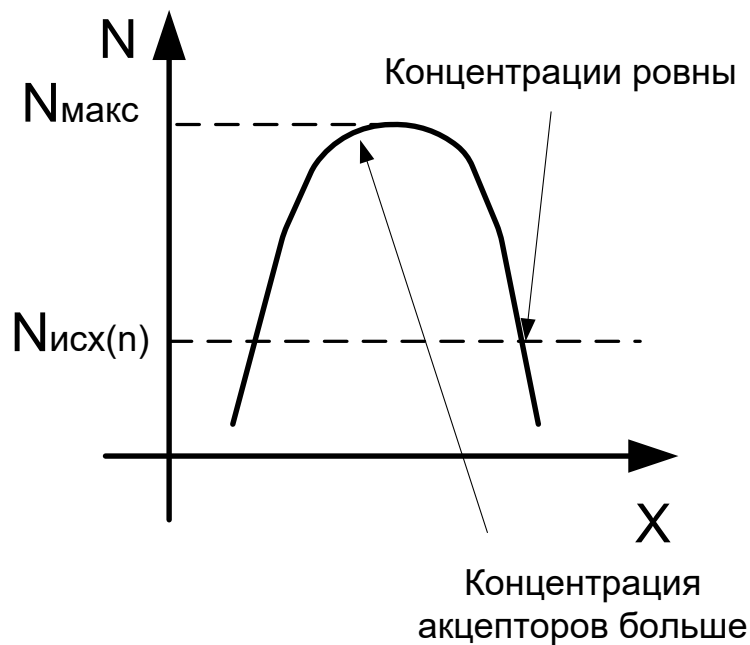


Рисунок 3.5 – Профиль распределения примесей при ионное легировании

Эпитаксия: процесс осаждения атомарного кремния на монокристаллическую кремниевую пластину, при котором получают пленку, продолжающую структуру пластины (рисунок 3.6).

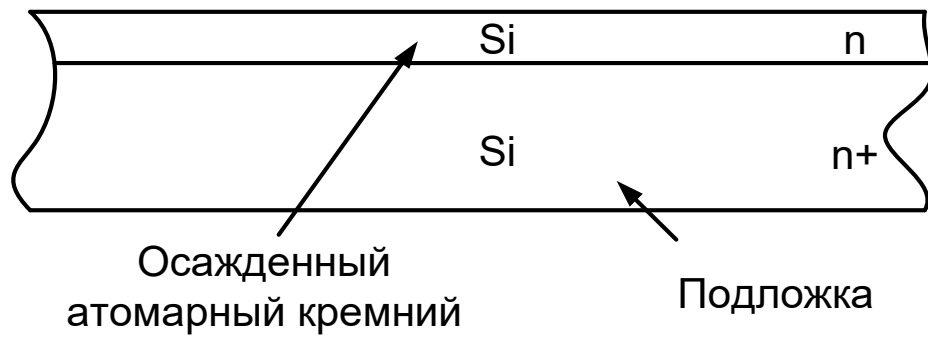


Рисунок 3.6 – Эпитаксия

Термическое окисление: процесс, позволяющий получить на поверхности кремниевых пластин пленку диоксида кремния (рисунок 3.7)

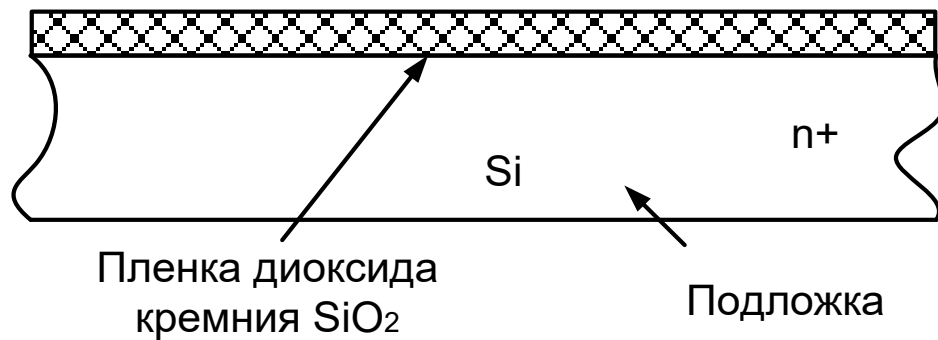


Рисунок 3.7 – Термическое окисление

Травление: процесс удаления поверхностного слоя не механическим, а химическим путем (рисунок 3.8).

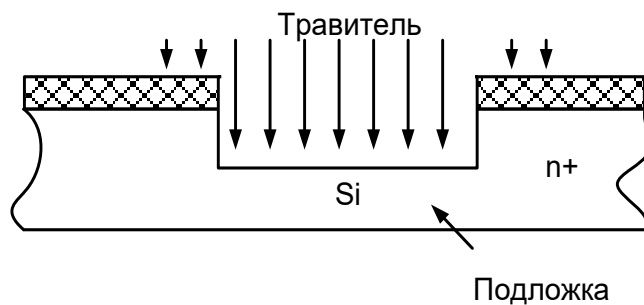


Рисунок 3.8 – Травление

Нанесение тонких пленок: процесс создания проводников соединений, резисторов, конденсаторов и изоляции между элементами и проводниками.

Металлизация: нанесение на кремниевую пластину сплошной металлической пленки.

Фотолитография: процесс формирования отверстий в масках, создаваемых на поверхности пластины, предназначенных для легирования, травления, окисления, напыления и других операций (рисунок 3.9).

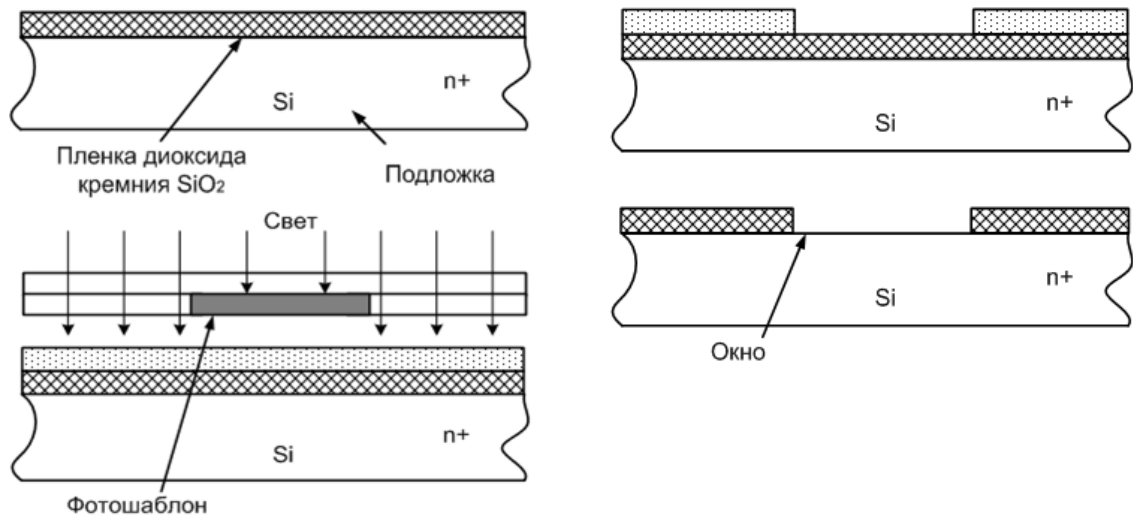


Рисунок 3.9 - фотолитография

3.2 Последовательность формирования диффузионно-планарной структуры

В целом последовательность формирования диффузионно-планарной структуры имеет следующий вид:

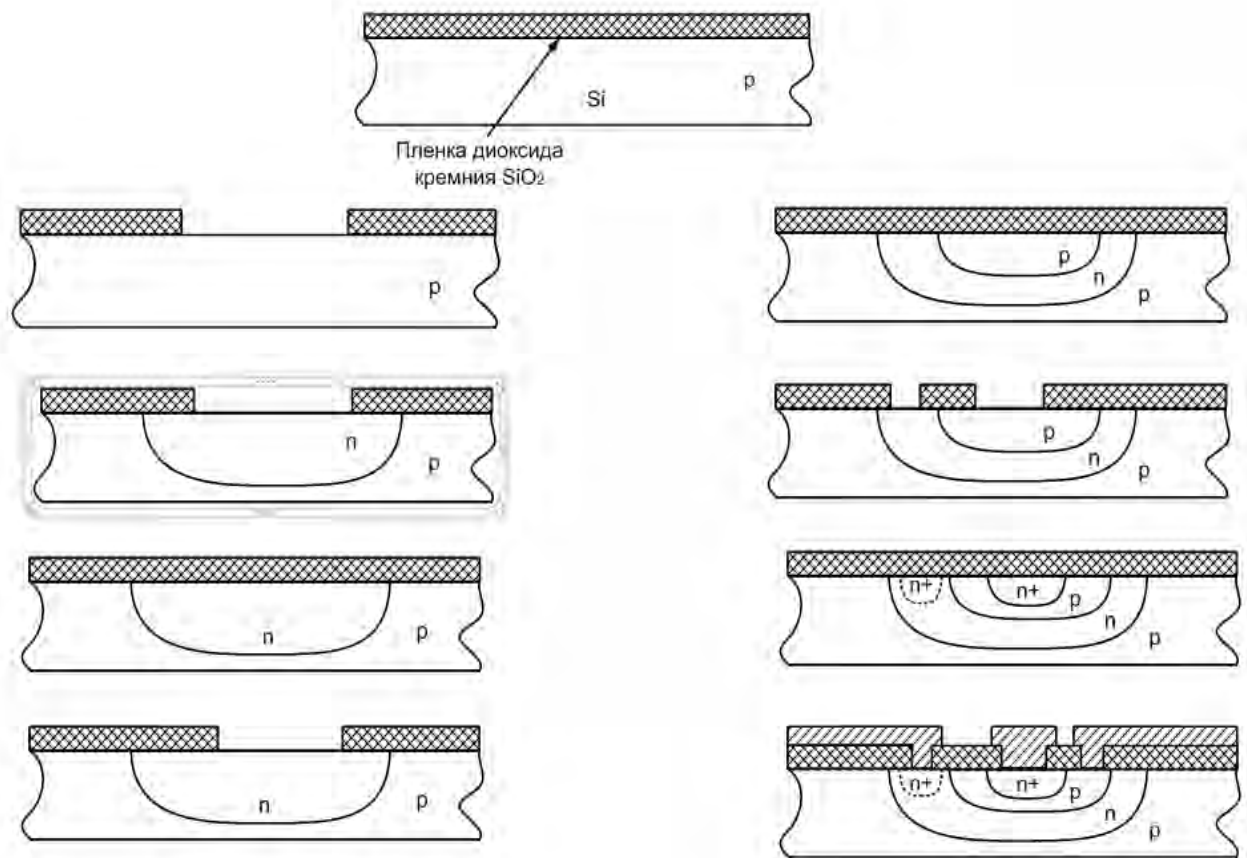


Рисунок 3.10 - Последовательность формирования диффузионно-планарной структуры

Раздел 4. Основы базовых технологических процессов. Травление, эпитаксия, термическое окисление, диффузия и ионная имплантация

4.1 Эпитаксия

Термин эпитаксия означает наращивание кристаллографически ориентированных монокристаллических слоев на монокристаллические подложки или друг на друга. Монокристаллическая подложка в процессе выращивания играет роль затравочного кристалла.

Гомоэпитаксия — это наращивание монокристаллической пленки на подложку из того же вещества, что и пленка.

Гетероэпитаксия — это наращивание пленки на инородную подложку.

Эпитаксия легко осуществляется, если различие постоянных решёток не превышает 10 %. При больших расхождениях сопрягаются наиболее плотноупакованные плоскости и направления. При этом часть плоскостей одной из решёток не имеет продолжения в другой; края таких оборванных плоскостей образуют дислокации несоответствия (рисунок 4.1).

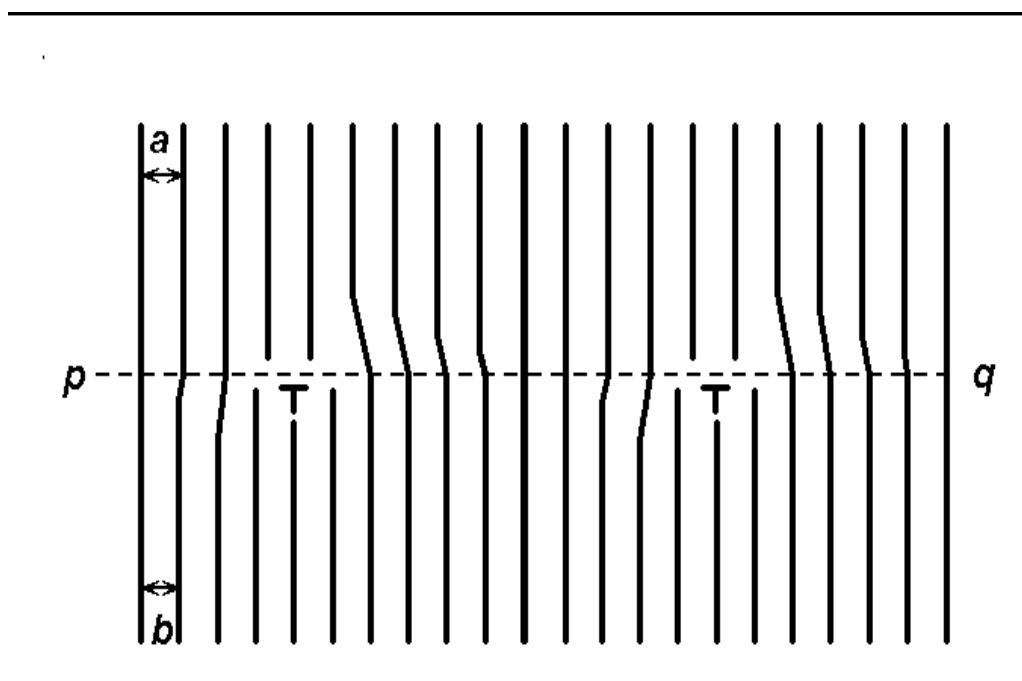


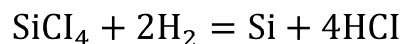
Рисунок 4.1 – Схема возникновения дислокаций несоответствия

4.1.1 Эпитаксия из газовой фазы

Для выращивания эпитаксиального кремния используется один из четырех кремнесодержащих реагентов (тетрахлорид кремния - SiCl_4 , трихлорсилан - SiHCl_3 , дихлорсилан - SiH_2Cl_2 и силан - SiH_4) и водород.

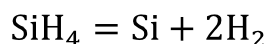
Хлоридный метод:

При использовании в качестве источника тетрахлорида кремния суммарная реакция может быть записана в виде:



Скорость роста слоя — 0,1-2,0 мкм/мин в зависимости от источника кремния, температуры и давления. Она пропорциональна концентрации кремнийсодержащего компонента в парогазовой фазе.

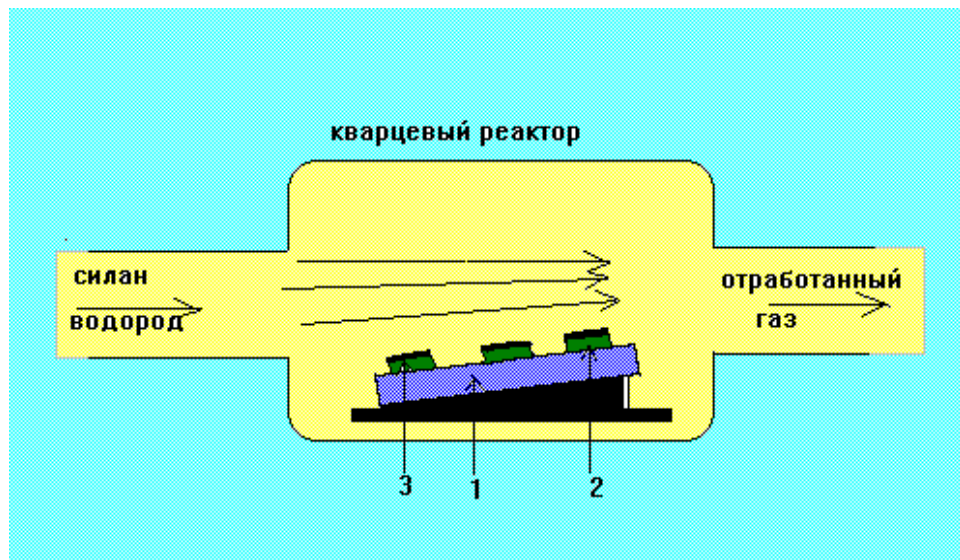
Силановый метод:



Разложение происходит при $t=1050\text{ }^\circ\text{C}$, что, по сравнению с хлоридным методом, замедляет диффузию и уменьшает вредный эффект автолегирования. Благодаря этому, данным методом удаётся получать более резкие переходы между слоями.

Технология проведения:

Процесс проводится при атмосферном или пониженном давлении в специальных реакторах (рисунок 4.2) вертикального или горизонтального типа. Реакция идёт на поверхности подложек (полупроводниковых пластин), нагретых до $750\text{—}1200\text{ }^\circ\text{C}$ (в зависимости от способа осаждения, скорости процесса и давления в реакторе). Разогрев подложек осуществляется инфракрасным излучением, индукционным или резистивным способом. Понижение температуры процесса ниже предельной для данных конкретных условий осаждения ведет к формированию поликристаллического слоя.



1 – держатель; 2 – кремниевая пластина; 3 – плёнка.

Рисунок 4.2 – Схема реактора для эпитаксии из парогазовой смеси

Формирование эпитаксиальных пленок осуществляется при ламинарном течении газа по трубе, т. е. когда число Рейнольдса меньше критического значения.

$$Re = D \cdot v \cdot \frac{\rho}{\eta}$$

$Re_{\text{крит}} = 2000$,

где D – диаметр трубы реактора, v – скорость течения газа, ρ – плотность газа, η – коэффициент вязкости газа.

При конструировании реактора необходимо учитывать, что по мере продвижения вглубь трубы скорость движения газа в пристеночной области шириной y падает, а температура соответственно растет:

C - концентрация

T - температура

V - скорость потока

- - границы слоев

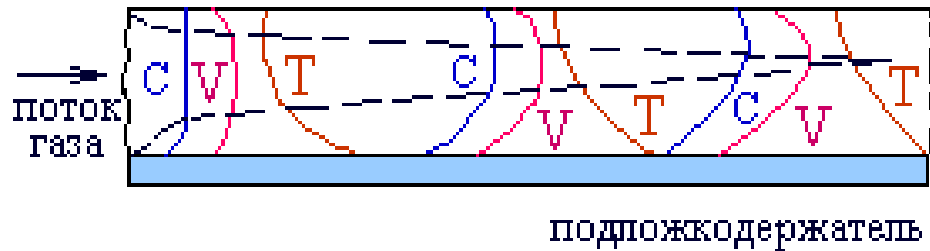


Рисунок 4.3 - Образование приграничного слоя в горизонтальном реакторе

Это и определяет скорость реакции на поверхности, поскольку именно через пограничный слой исходные реагенты переносятся из газового потока к поверхности, а продукты реакции диффундируют в обратном направлении, удаляясь затем основным потоком газа. Поток реагентов J от поверхности подложки или обратно задается уравнением:

$$J = D \cdot \frac{dn}{dy}$$

$$J = \frac{(n_{\text{газ}} - n_{\text{пов}})}{y}$$

где $n_{\text{газ}}$ и $n_{\text{пов}}$ - концентрация реагентов в газовом потоке и вблизи поверхности соответственно,

D - коэффициент диффузии реагента в газовой фазе, являющийся функцией давления и температуры,

J - поток реагентов, характеризующий количество молекул, проходящее через единицу площади за единицу времени,

$\frac{dn}{dy}$ - градиент концентрации реагентов.

4.1.2 Жидкофазная эпитаксия

Эпитаксия из жидкой фазы в основном применяется для получения многослойных полупроводниковых соединений, таких как GaAs, CdSnP₂; также является основным способом получения монокристаллического кремния.

Готовится шихта из вещества наращиваемого слоя, легирующей примеси (может быть подана и в виде газа) и металла-растворителя, имеющего низкую температуру плавления и хорошо растворяющий материал подложки (Ga, Sn, Pb). Процесс проводят в атмосфере азота и водорода (для восстановления оксидных плёнок на поверхности подложек и расплава) или в вакууме (предварительно восстановив оксидные плёнки). Расплав наносится на поверхность подложки, частично растворяя её и удаляя загрязнения и дефекты. После выдержки при максимальной температуре ≈ 1000 °C начинается медленное охлаждение. Расплав из насыщенного состояния переходит в пересыщенное и избытки полупроводника осаждаются на подложку, играющую роль затравки.

В современной промышленности данный метод не используется, ввиду сложности контроля параметров получаемых пленок (толщина, однородность толщины, значение стехиометрического коэффициента), их относительно низкого качества, малой производительности метода.

Однако, для некоторых экзотических полупроводниковых соединений на данный момент является единственно возможной, и остается вопросом лабораторных исследований.

4.1.3 Молекулярно – лучевая эпитаксия (МЛЭ)

Молекулярно – лучевая эпитаксия (МЛЭ) - эпитаксиальный рост в условиях сверхвысокого вакуума. Позволяет выращивать гетероструктуры заданной толщины с моноатомно гладкими гетерограницами и с заданным профилем легирования. В установках МЛЭ имеется возможность исследовать качество плёнок «in situ» (то есть прямо в камере во время роста). Для процесса эпитаксии необходимы специальные хорошо очищенные подложки с атомарногладкой поверхностью.

Механизмы наращивания эпитаксиальных пленок делятся на прямые и не прямые.

- 1) Непрямое наращивание происходит, когда атомы кремния образуются за счет разложения кремниевых соединений на поверхности нагретой подложки;
- 2) Прямое наращивание происходит, когда атомы кремния непосредственно

попадают на поверхность подложки и осаждаются на ней, как это имеет место при молекулярно-лучевой эпитаксии;

В основе метода лежит осаждение испаренного в молекулярном источнике вещества на кристаллическую подложку. Несмотря на простую идею, реализация данной технологии требует сложных технических решений. Основные требования к установке эпитаксии (рисунок 1.30) следующие:

- 1) В рабочей камере установки необходимо поддерживать сверхвысокий вакуум (около 10^{-8} Па);
- 2) Чистота испаряемых материалов должна достигать 99,999999 %;
- 3) Необходим молекулярный источник, способный испарять тугоплавкие вещества (такие как металлы) с возможностью регулировки плотности потока вещества.

Особенностью эпитаксии является невысокая скорость роста пленки (обычно менее 1000 нм в час).

Устройство установки молекулярно–пучковой эпитаксии

1. Вакуумная камера.

Камера создаётся из нержавеющей сплава высокой чистоты. Для обеспечения вакуума в камере, перед работой ее прогревают до высоких температур. При этом происходит дегазация поверхности. В современных установках могут использоваться несколько соединенных единой транспортной системой камер:

- 1) Рабочая камера, в которой осуществляется рост структуры;
- 2) Загрузочная камера, выполняющая роль шлюза между рабочей камерой и атмосферой;
- 3) Исследовательская камера с приборами.

2. Насосы.

Форвакуумный насос — производит начальное откачивание газа из установки (до давления около 0,5 Па).

Абсорбционный насос — использует материалы с развитой поверхностью (например, порошок цеолита), которые при сильном охлаждении (жидким азотом) вбирают в себя часть газа из установки.

Магниторазрядный насос — откачка этим насосом производится благодаря наличию в нем распыляемых титановых электродов. Распыленный титан переосаждается на рабочую поверхность насоса, образуя пленку, которая «прикрывает» попавший на поверхность газ. Используется для достижения сверхвысокого вакуума.

3. Манипулятор.

Манипулятор (подложкодержатель) используется для крепления подложки, её вращения и нагревания. Встроенный в манипулятор нагреватель обеспечивает предварительный прогрев образца для очистки его от грязи и сгона защитного слоя окисла. Во время работы нагреватель поддерживает постоянную температуру подложки, при которой происходит миграция адсорбированных атомов (адатомов) осаждаемого вещества по поверхности (диффузия). Тем самым обеспечивается процесс самосборки, то есть формирования атомарно гладких монослоев.

4. Молекулярные источники

Для испарения необходимых для роста веществ используются молекулярные источники. Они состоят из следующих элементов:

- 1) Тигель из тугоплавкого материала (чистый нитрид бора или графит). От формы тигля зависит форма и однородность молекулярного пучка;
- 2) Нагреватель (намотанная вокруг тигля спираль). Температура нагрева достигает 1900 К;
- 3) Термопара для измерения температуры тигля. От температуры зависит плотность потока вещества в пучке;
- 4) Заслонка перед тиглем. С ее помощью можно резко выключать пучок для формирования четких гетерограниц в образце.

Испаренное в тигле вещество в виде пучка попадает на подложку. Благодаря сверхвысокому вакууму молекулы вещества распространяются практически по прямой не испытывая соударения с молекулами газа (то есть длина свободного пробега молекул больше расстояния от источника до подложки).

В случае использования тугоплавких материалов или веществ с высокой химической активностью используется автотигельный метод испарения. Электронный пучок попадает в вещество и расплавляет небольшой участок. Таким образом вещество само является тиглем. Современные устройства контроля электронного пучка позволяют изменять его направление, фокус, интенсивность и другие параметры с целью получить равномерный атомарный пучок или повысить эффективность расхода материала.

5. Криопанели и системы контроля параметров роста

Для улучшения вакуума и вымораживания не попавших на подложку молекул испаряемого вещества вокруг манипулятора установлены криопанели — емкости, заполненные жидким азотом. Также они используются для разделения молекулярных источников друг от друга по температуре.

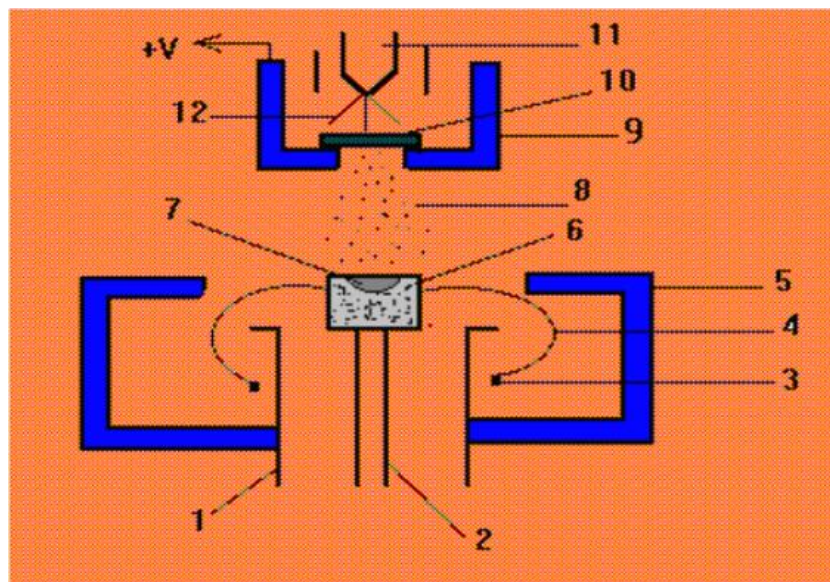
6. Вакууметры для измерения давления в камере

7. Масс-спектрометр для контроля состава молекулярного пучка, состава

атмосферы и давления в камере

8. Термодатчики для измерения температуры образца, тиглей источников

9. Оборудование для исследования на основе дифракции отраженных электронов (in-situ метод).



- 1- экран; 2 - основа с водяным охлаждением; 3 - нить накала источника;
4 - электронный пучок; 5 - электростатический экран (-V); 6 - твердый кремний; 7 - расплавленный кремний; 8 - пары кремния; 9 - держатель подложки; 10 – кремниевая подложка; 11 - нить подогрева подложки; 12 - электронный пучок.

Рисунок 4.4 - Схема реактора для МЛЭ кремния

Механизм МЛЭ

При соответствующих условиях осаждения атомы кремния, двигаясь по нагретой поверхности, занимают положения, соответствующие кристаллической структуре подложки. Иными словами эпитаксиальное наращивание состоит в образовании центров кристаллизации и последовательном формировании двумерной решетки из островков, растущих вдоль поверхности (рисунок 4.5). Процесс эпитаксиального наращивания на поверхности пластины происходит в следующей последовательности:

- 1) массопередача вступающих в реакцию молекул посредством диффузии из потока через граничный слой к поверхности кремния;
- 2) адсорбция молекул поверхностью;
- 3) процесс реакции на поверхности;
- 4) десорбция продуктов реакции;
- 5) массопередача молекул продуктов реакции посредством диффузии через граничный слой к основному потоку газа;

6) упорядочение адсорбированных атомов кремния в решетке.

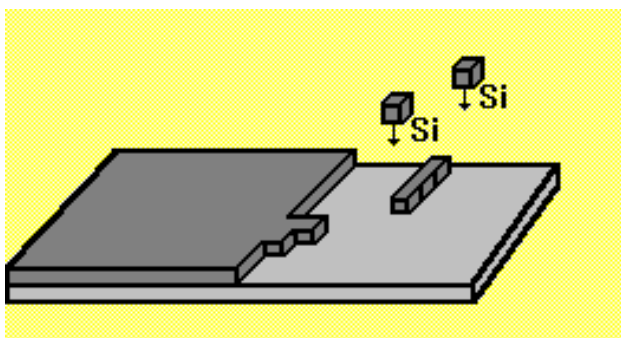


Рисунок 4.5 – Эпитаксиальное наращивание

Энергия активации процесса равна приблизительно 5 эВ и соответствует энергии активации самодиффузии кремния. Попытка увеличения скорости роста пленки выше оптимального значения, зависящего от температуры, приводит к росту поликристаллической пленки (уменьшается время поверхностной миграции и происходит встраивание кремния в произвольные, а не только кристаллографически благоприятные места).

Для легирования кремния используются гидриды примесных элементов (арсин AsH_3 , диборан B_2H_6 , фосфин PH_3). Процессы, происходящие на поверхности кремния при осаждении:

- 1) адсорбция мышьяка на поверхности;
- 2) диссоциация молекулы;
- 3) встраивание мышьяка в растущий слой.

Для легирования GaAs используются следующие примеси:

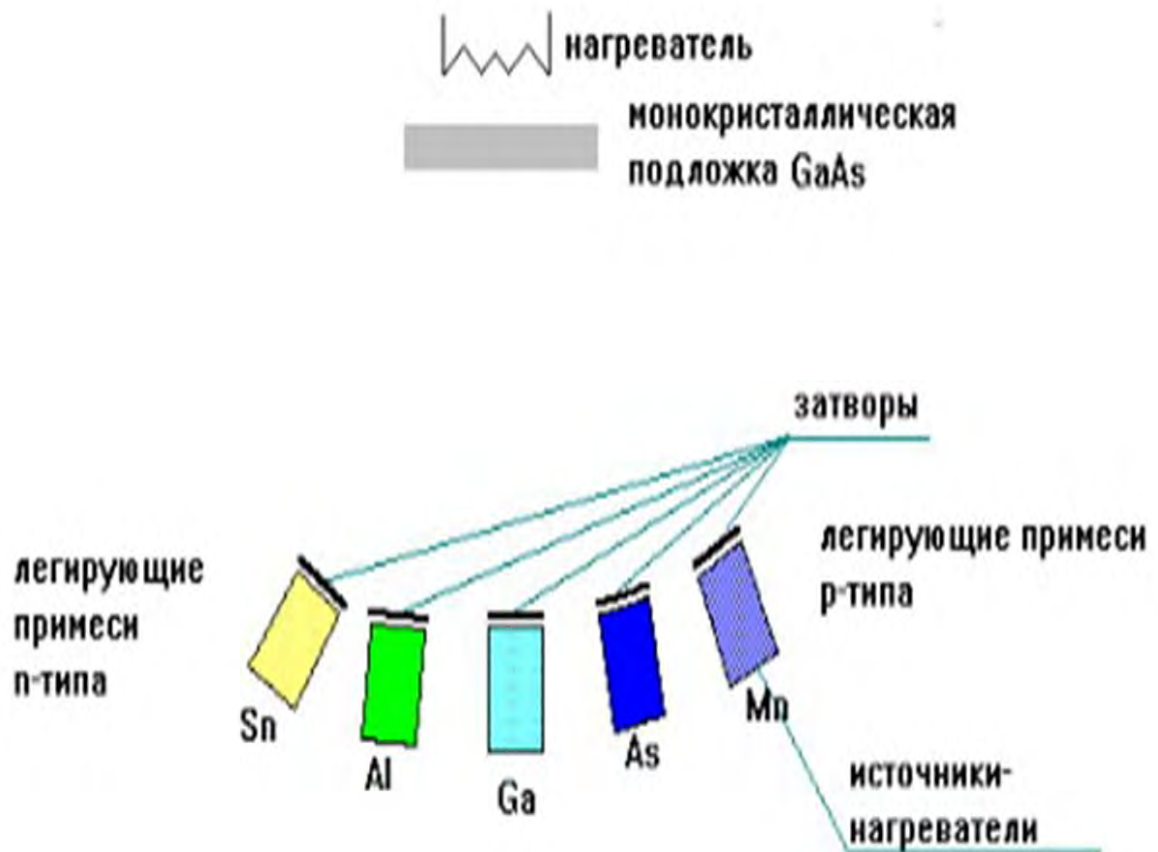
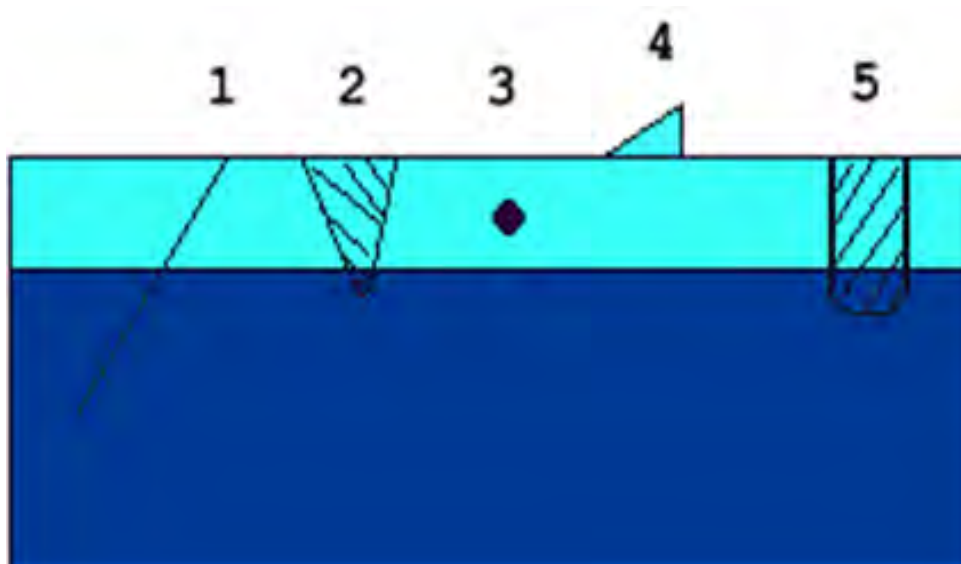


Рисунок 4.6 - Схема установки молекулярно-лучевой эпитаксии арсенида галлия с легированием

При эпитаксии возникают различные виды дефектов, которые отражены на рис.4.7.



1 - линейная дислокация, проросшая в эпитаксиальный слой; 2 - дефекты, зарождающиеся на примесных преципитатах, расположенных на поверхности подложки; 3 - примесные преципитаты, возникшие во время роста эпитаксиального слоя; 4 - бугорки на поверхности, возникающие из-за неудовлетворительных условий процесса или плохого исходного состояния поверхности; 5 - дефекты упаковки, проросшие в эпитаксиальный слой.

Рисунок 4.7 – Дефекты эпитаксиальных плёнок

МЛЭ позволяет получать следующие структуры с пониженной размерностью:

- 1) 0-мерные: квантовые точки;
- 2) 1-мерные: квантовые нити (также называемые «квантовыми проволоками»);
- 3) 2-мерные: квантовые ямы, сверхрешётки, плоские волноводы.

К примеру, используя селективный рост, можно вырастить нанопроволоку на краю подложки с заранее выращенной гетероструктурой. Основное преимущество метода — возможность создания уникальных наноструктур с очень высокой чистотой, однородностью и малым количеством дефектов. К недостаткам метода можно отнести высокую цену оборудования и исходных материалов, малую скорость роста, сложность поддержания высокого вакуума.

4.2 Термическое окисление

Окисление кремния — один из самых характерных процессов в технологии современных ИС. Получаемая при этом пленка двуокиси кремния

выполняет несколько важных функций, в том числе:

- 1) функцию защиты — пассивации поверхности и, в частности, защиты вертикальных участков-переходов, выходящих на поверхность (рисунок 4.8 а);
- 2) функцию маски, через окна которой вводятся необходимые примеси (рисунок 4.8 б);
- 3) функцию тонкого диэлектрика под затвором МОП-транзистора (рисунок 4.8 в).

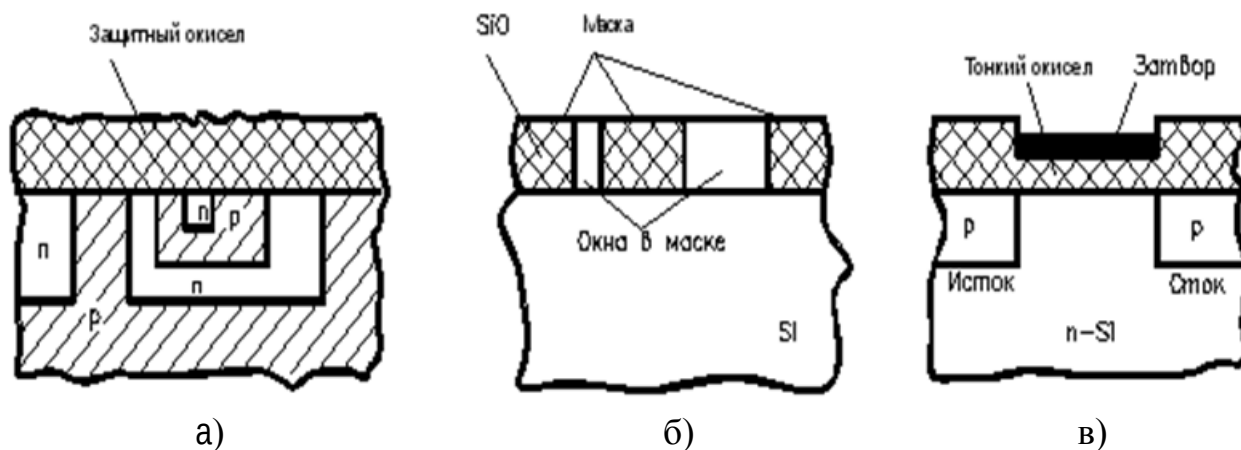


Рисунок 4.8 – Функции диоксида кремния

Поверхность кремния всегда покрыта «собственной» окисной пленкой, получающейся в результате «естественного» окисления при самых низких температурах. Однако эта пленка имеет слишком малую толщину (около 5 нм), чтобы выполнять какую-либо из перечисленных функций. Поэтому в технологии ИС пленки получают искусственным путем. Искусственное окисление кремния осуществляется обычно при высокой температуре (1000—1200 °С). Такое термическое окисление можно проводить в атмосфере кислорода (сухое окисление), в смеси кислорода с парами воды (влажное окисление) или просто в парах воды. Во всех случаях процесс проводится в окислительных печах. Основу таких печей составляет, как и при эпитаксии, кварцевая труба, в которой размещается «лодочка» с пластинами кремния, нагреваемая либо токами высокой частоты, либо иным путем. Через трубу пропускается поток кислорода (сухого или увлажненного) или пары воды, которые реагируют с кремнием в высокотемпературной зоне. Получаемая таким образом пленка имеет аморфную структуру.

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

- 1) диффузия атомов кремния через уже имеющуюся пленку окисла к поверхности;
- 2) адсорбция молекул кислорода поверхностью из газовой фазы;

3) собственно окисление, т. е. химическая реакция. В этом случае пленка нарастает над исходной поверхностью кремния.

Второй вариант состоит из следующих этапов:

- 1) адсорбция кислорода поверхностью уже имеющегося окисла;
- 2) диффузия кислорода через окисел к еще не окисленному кремнию;
- 3) собственно окисление. В этом случае пленка нарастает вглубь от исходной поверхности кремния.

На практике оба механизма сочетаются, но главную роль обычно играет второй. Скорость роста окисла со временем убывает, так как новым атомам кислорода приходится диффундировать через все более толстый слой окисла. При влажном окислении кислород предварительно пропускают через сосуд с водой. Сухое окисление идет в десятки раз медленнее влажного. Например, для выращивания пленки толщиной 0,5 мкм в сухом кислороде при 1000 °С требуется около 5 ч., а во влажном — всего 20 мин. С уменьшением температуры на каждые 100 °С время окисления возрастает в 2—3 раза.

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

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

Качество окисной пленки повышается с уменьшением температуры ее выращивания, а также при использовании сухого кислорода. Поэтому тонкий подзатворный окисел, от качества которого зависит стабильность параметров МОП—транзистора, получают сухим окислением. При выращивании толстого окисла чередуют сухое и влажное окисление: первое обеспечивает отсутствие дефектов, а второе позволяет сократить время процесса (рисунок 4.9).

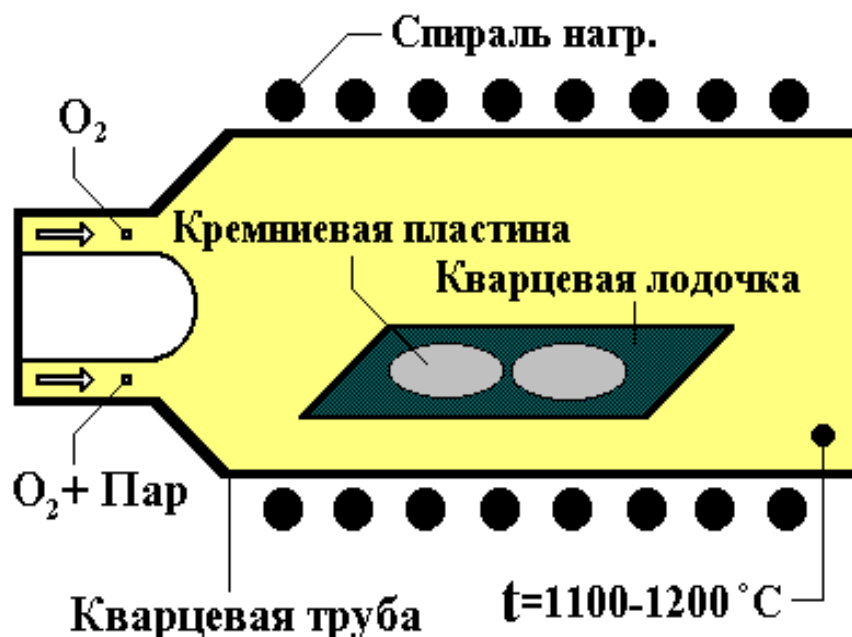


Рисунок 4.9 – Схема оборудования для термического окисления

Важнейший параметр при осаждении SiO_2 - воспроизводимость рельефа:

- 1) Конформное воспроизведение. Толщина пленки на стенках ступеньки не отличается от толщины на дне и поверхности. Обусловлено быстрой поверхностной миграцией (рисунок 4.10а).
- 2) Неконформное воспроизведение при отсутствии поверхностных миграций и больших значениях величины среднего пробега молекулы в газе (рисунок 4.10б).
- 3) Неконформное воспроизведение при отсутствии поверхностных миграций и малых значениях величины среднего пробега молекулы в газе (по сравнению с размерами ступеньки) (рисунок 4.10в).

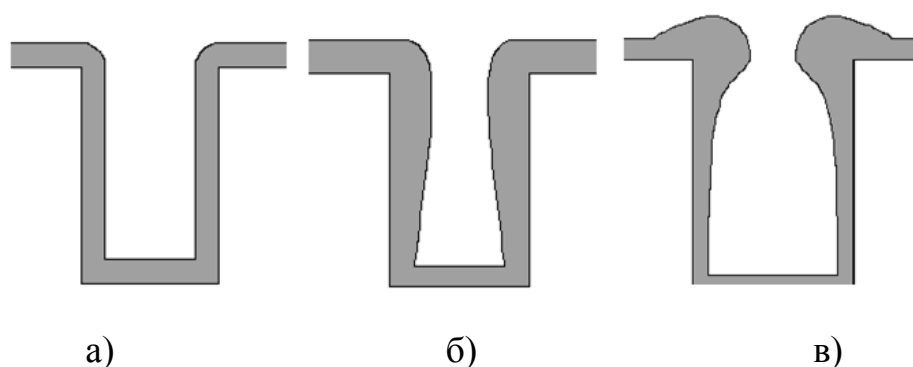


Рисунок 4.10 – Воспроизводимость рельефа

4.3. Ионная имплантация и диффузия примесей

Для понимания процесса ионной имплантации необходимо изучить виды взаимодействий ионов с твёрдым телом и ионное каналирование. Взаимодействие ионов высоких энергий с поверхностью твёрдого тела представлено на рис.4.11.

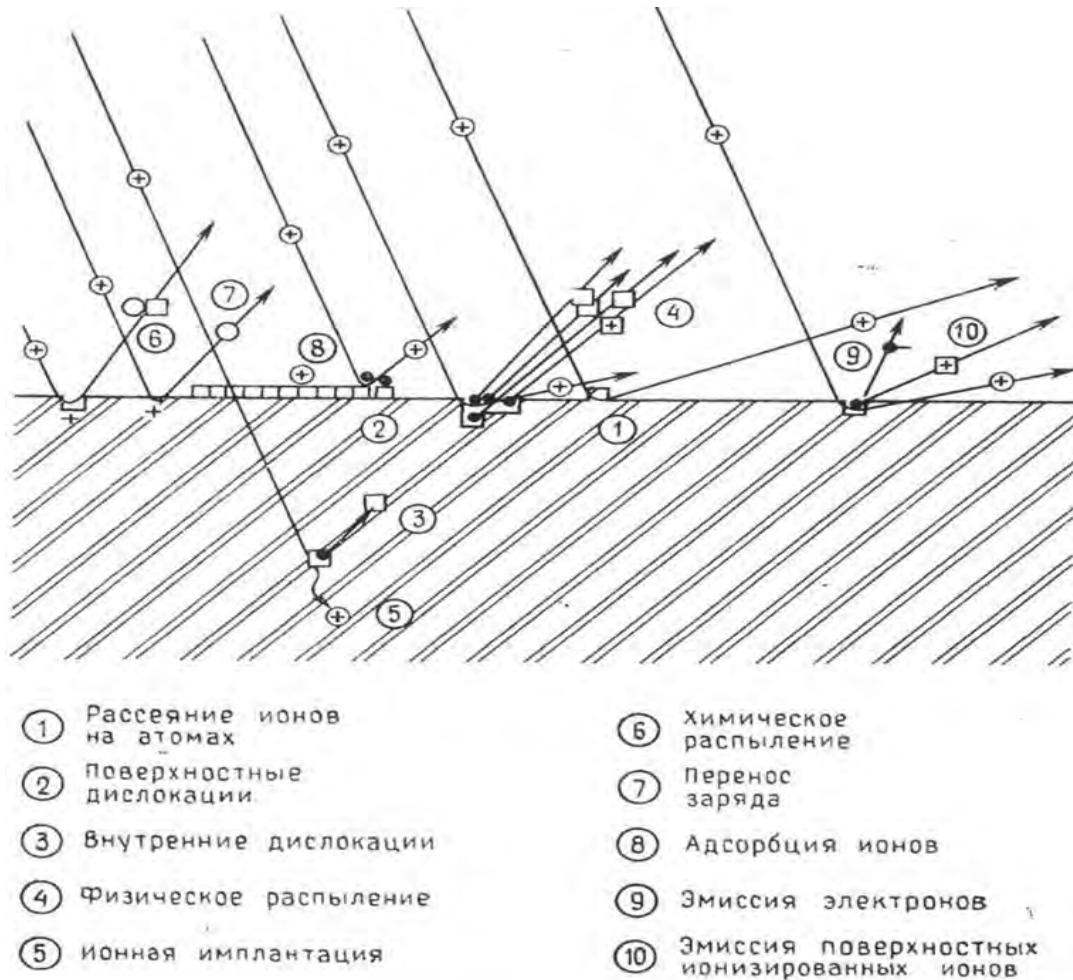


Рисунок 4.11 – Виды взаимодействий ионов с твёрдым телом

Ионное каналирование.

Эффект каналирования наблюдается при попадании иона в свободное пространство между рядами атомов. В результате этого ион продвигается на значительные расстояния. Такой ион постепенно теряет энергию за счет слабых скользящих столкновений со стенками канала и, в конце концов, покидает эту область. Расстояние, проходимое ионом в канале, может в несколько раз превышать длину пробега иона в аморфной мишени. Эффект каналирования характеризуется наличием "хвостов" концентрации атомов (рисунок 4.12). Попытки устранения эффекта каналирования путем ориентации кремниевой монокристаллической подложки в наиболее плотно упакованных направлениях

сводят его к минимуму, но не исключают полностью.

Были сделаны попытки практического использования эффекта каналирования при имплантации примеси на большую глубину. Однако в этом случае значительно затруднены управление профилем распределения имплантируемой примеси и получение воспроизводимых результатов из-за очень высоких требований к точности разориентации ионного пучка относительно основных кристаллографических направлений в подложке.

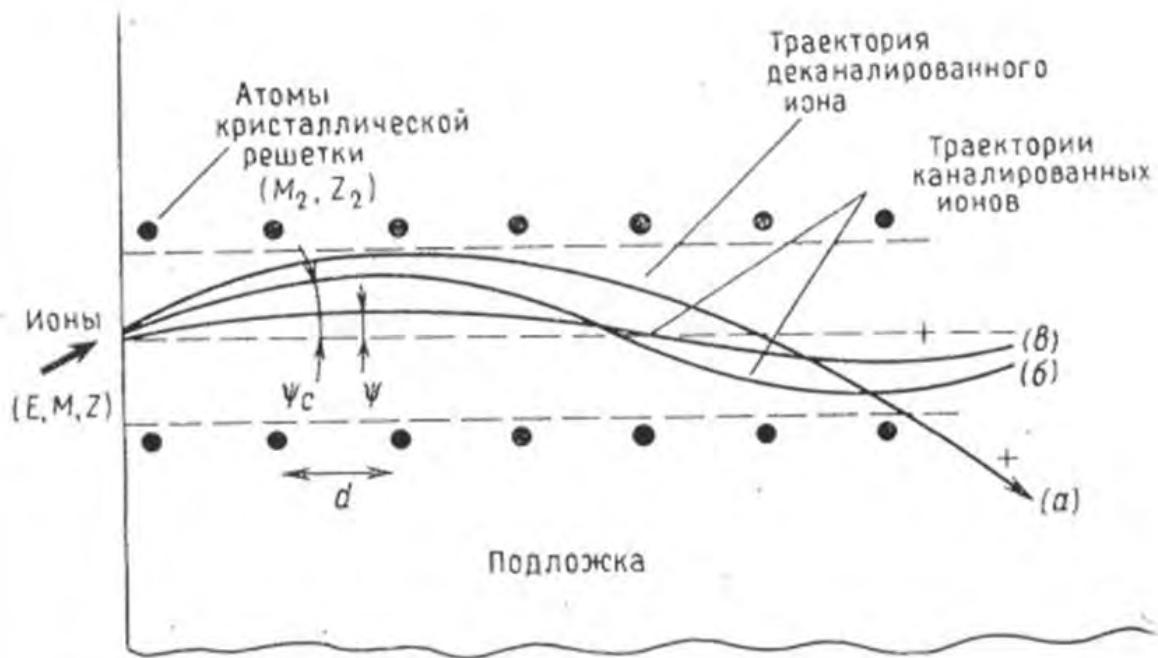


Рисунок 4.12– Эффект каналирования

4.3.1 Ионная имплантация. Профили распределения примеси при ионной имплантации. Дефекты при ионной имплантации и способы их устранения.

Ионной имплантацией (ионным легированием) называется процесс внедрения в мишень ионизованных атомов с энергией, достаточной для проникновения в ее приповерхностные области.

Во многих случаях для получения необходимого профиля распределения легирующей примеси в подложке применяют метод, основанный на предварительной загонке ионов с их последующей термической разгонкой в мишени. При этом имплантация проводится с малой энергией ионов.

Общая траектория движения иона называется длиной пробега R , а

расстояние, проходимое внедряемым ионом до остановки в направлении, перпендикулярном к поверхности мишени, проецированной длиной пробега R_p .

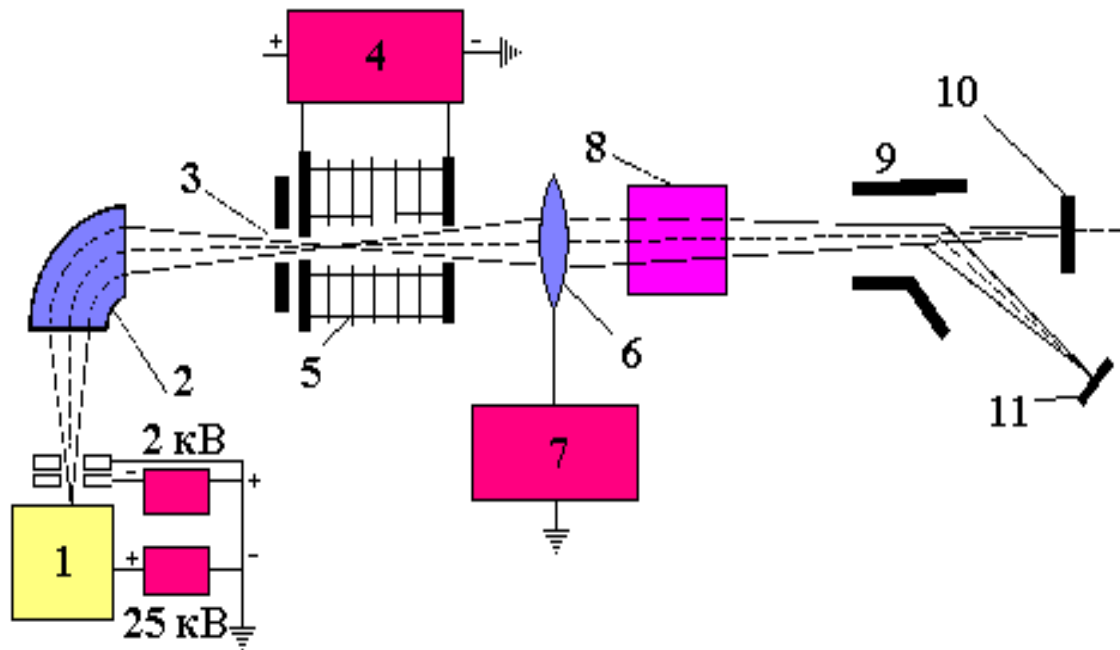
Применение ионной имплантации.

1. Создание мелких переходов

Требование формирования n^+ слоев, залегающих на небольшой глубине, для СБИС можно легко удовлетворить с помощью процесса ионной имплантации As. Мышьяк имеет очень малую длину проецированного пробега (30 нм) при проведении обычной имплантации с энергией ионов 50 кэВ.

Одной из прогрессивных тенденций развития СБИС является создание КМОП- транзисторов. В связи с этим большое значение имеет получение мелких p^+ - слоев. Такие слои очень сложно сформировать путем имплантации ионов B^+ .

Решение проблемы, связанной с имплантацией бора на небольшую глубину, на практике облегчается использованием в качестве имплантируемых частиц BF_2 . Диссоциация молекулы BF_2^+ при первом ядерном столкновении приводит к образованию низкоэнергетических атомов бора. Кроме того, использование молекулы BF_2 имеет преимущество при проведении процесса отжига структур.



1 - источник ионов; 2 - масс-спектрометр; 3 - диафрагма; 4 - источник высокого напряжения; 5 - ускоряющая трубка; 6 - линзы; 7 - источник питания линз; 8 - система отклонения луча по вертикали и система отклонения луча; 9 - система отклонения луча по горизонтали; 10 - мишень для поглощения нейтральных частиц; 11 - подложка.

Рисунок 4.13 – Схема установки для ионной имплантации

Геттерирование — процесс связывания в нейтральные ассоциации подвижных, нежелательных примесей и дефектов на границах раздела, образованных внешней поверхностью. Процесс геттерирования основан на трех физических эффектах:

- 1) освобождение примесей или разложение протяженных дефектов на составные части
- 2) диффузия примесей или составных частей дислокаций
- 3) поглощении примесей или собственных межузельных атомов некоторым стоком

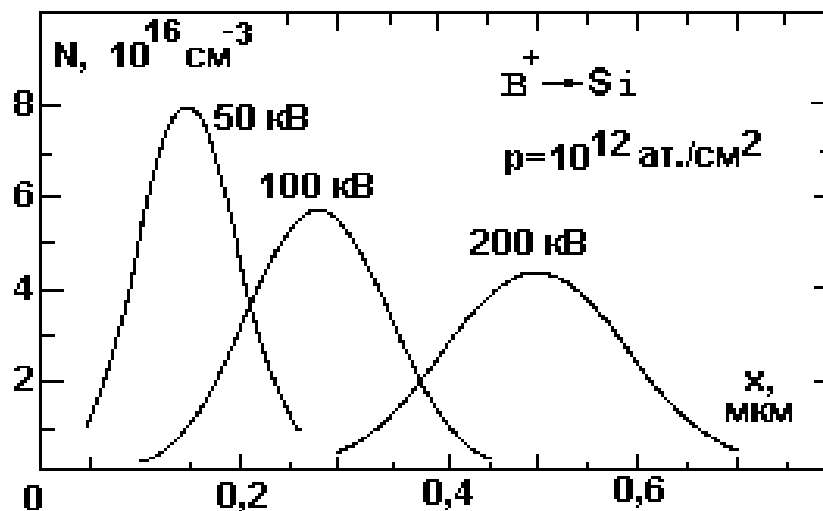


Рисунок 4.14 - Профиль распределения примеси при ионной имплантации бора различных энергий в кремний

Радиационные дефекты

При внедрении ионов в кремниевую кристаллическую подложку они подвергаются электронным и ядерным столкновениям, однако, только ядерные взаимодействия приводят к смещению атомов кремния.

Тяжелые ионы смещают большое количество атомов мишени из узлов кристаллической решетки вблизи поверхности подложки. Вводимые в процессе ионной имплантации дефекты состоят из вакансий и междоузельных атомов. При нагреве мишени пучком ионов в процессе имплантации до температуры выше 500 °С будут образовываться дислокации.

Легкие ионы ^{11}B испытывают в основном электронное торможение. Тяжелые ионы ^{31}P или ^{75}As тормозятся атомами кремния. В зависимости от энергии переданной атому кремния (D_E) различают следующие случаи (E_d -

энергия смещения атома):

- 1) $D_E < E_d$ - смещения атома не происходит;
- 2) $D_E = E_d$ - образуются простые точечные дефекты;
- 3) $D_E \geq E_d$ - формирование стабильных дефектов и вторичные перемещения атомов;
- 4) $D_E \gg E_d$ - образуются кластеры дефектов.

Количество атомов примеси замещающих атомы кремния соответствует точно количеству падающих ионов после их торможения в подложке. Однако радиационные дефекты создают большее число энергетических состояний с глубокими уровнями, чем количество имплантируемых атомов, если не производить отжига структур после имплантации.

Параметры процесса отжига определяются дозой и видом имплантированных ионов:

- 1) Изохорный отжиг структур;
- 2) Изотермический отжиг;
- 3) БТО (Имплантированные слои подвергают лазерному или электронному отжигу с плотностью энергии в диапазоне 1-10 Дж/см². Вследствие короткого времени нагрева имплантированные слои могут быть термообработаны без заметной диффузии примеси. Имплантированные аморфные слои толщиной 100 нм перекристаллизуются в течение нескольких секунд при $T = 800$ °C по механизму твердофазной эпитаксии.).

4.3.2 Термическая диффузия примесей

При рассмотрении диффузионных процессов следует выделить два класса задач: первый - построение профилей распределения примесей и второй - определение геометрических размеров легированных областей (глубин залегания) при заданных технологических режимах процесса диффузии.

Задачи технологического этапа диффузии:

управление концентрацией легирующей примеси в подложке,
обеспечение однородности легирования,
обеспечение воспроизводимости процесса,
увеличение числа подложек, подвергаемых одновременному легированию,
для снижения себестоимости продукции.

Назначение диффузии:

формирование базовых и эмиттерных областей и резисторов в биполярной технологии,
создание областей истока и стока в МОП технологии,
для легирования поликристаллического кремния.

В качестве легирующих примесей для кремния используют элементы 3 и 5 групп. Для кремния это бор (В), создающий области р-типа. Фосфор, мышьяк и сурьма - донорные примеси, создающие n-области. Источники легирующих примесей могут быть твердые, жидкие и газообразные. Несмотря на токсичность, наибольшее распространение получили газообразные источники вследствие возможности точной дозировки.

Источниками бора служат газообразные галогениды бора. Источниками фосфора служат PCl_3 , PH_3 и др. В последнее время в качестве источников примеси используются пластины из материалов, содержащих легирующую примесь. Их устанавливают в кассету, чередуя с полупроводником, и нагревают в потоке рабочего газа (кислорода или азота).

Результаты процесса диффузии можно проконтролировать измерением глубины р-n перехода и поверхностного сопротивления диффузионного слоя.

Глубину р-n перехода обычно определяют химическим окрашиванием отшлифованного под небольшим $1-5^\circ$ углом образца в смеси 100 мл плавиковой кислоты (49%) и нескольких капель азотной кислоты. Если образец, обработанный в этом растворе, выдержать на ярком свете 1-2 минуты, то область р - типа будет выглядеть темнее по сравнению с областью n - типа проводимости. С помощью интерферометра глубина р-n перехода может быть измерена с высокой точностью в пределах от 0.5 до 100 мкм.

Величину поверхностного сопротивления диффузионного слоя R_s можно измерить четырехзондовым методом, рассчитав ее по формуле:

$$R_s = C \cdot U / I,$$

где U - измеренная величина постоянного напряжения,

I - величина постоянного тока,

C - коэффициент коррекции, зависящий от геометрии образца и расстояния между электродами. Его величина изменяется от 1 до 4.5.

Раздел 5. Основные технологии напыления тонких пленок

Нет оптимального метода получения тонких пленок.

Выбор метода зависит от:

- типа требуемой пленки,
- от ограничений в выборе подложек
- в случае многократного осаждения - от общей совместимости различных процессов, протекающих при применении этого метода.

5.1 Термовакuumное напыление

Термовакuumный метод получения тонких пленок основан на нагреве в вакууме вещества до испарения и конденсации испаренных атомов на поверхности подложки.

Достоинства: высокая чистота осаждаемого материала (процесс проводится при высоком и сверхвысоком вакууме), универсальность (наносит пленки металлов, сплавов, полупроводников, диэлектриков) и относительная простота реализации.

Ограничения: нерегулируемая скорость осаждения, низкая, непостоянная и нерегулируемая энергия осаждаемых частиц.

Суть метода термовакuumного напыления можно пояснить с помощью упрощенной схемы установки, представленной на рис.5.1.

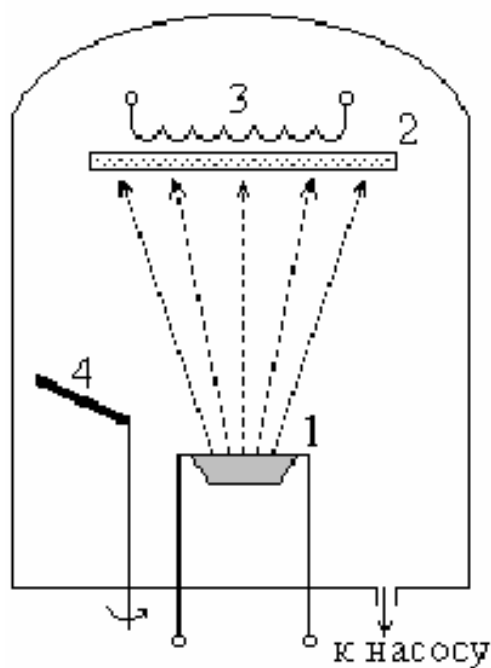


Рисунок 5.1 - Схема установки термовакuumного испарения

Напыляемое вещество помещают в испаритель 1. В вакууме, который создается внутри камеры специальными насосами, молекулы испаренного вещества свободно распространяются, достигая, поверхности подложки 2. Если температура подложки не превышает критического значения, происходит конденсация вещества на подложке. На начальном этапе испарения во избежание загрязнения пленки за счет примесей, адсорбированных поверхностью испаряемого вещества, а также для вывода испарителя на рабочую температуру используется заслонка 4, временно перекрывающая поток вещества на подложку.

В процессе осаждения контролируется время напыления, толщина, электрическое сопротивление или какой-либо другой параметр. По достижении заданного значения параметра заслонка вновь перекрывает поток вещества и процесс роста пленки прекращается. Нагрев подложки с помощью нагревателя 3 перед напылением способствует десорбции адсорбированных на ее поверхности атомов, а в процессе осаждения создает условия для улучшения структуры растущей пленки. Непрерывно работающая система откачки поддерживает вакуум порядка 10^{-4} Па.

5.2. Катодное распыление

Конструкция установки для катодного распыления, изображенной на рис. 2, состоит из газоразрядной камеры 1, в которую вводится рабочий газ (обычно аргон) под давлением 1 - 10 Па; катода 2, выполняющего функцию распыляемой мишени; анода 3 и закрепленной на ней подложки 4. Между анодом и катодом подается постоянное напряжение величиной несколько киловольт, обеспечивающее создание в межэлектродном пространстве электрического поля напряженностью порядка 0,5 кВ/см. Анод заземлен, а отрицательное напряжение к катоду подается через изолятор 5. Чтобы исключить загрязнение стеклянного колпака камеры, вблизи катода закрепляют экран 6.

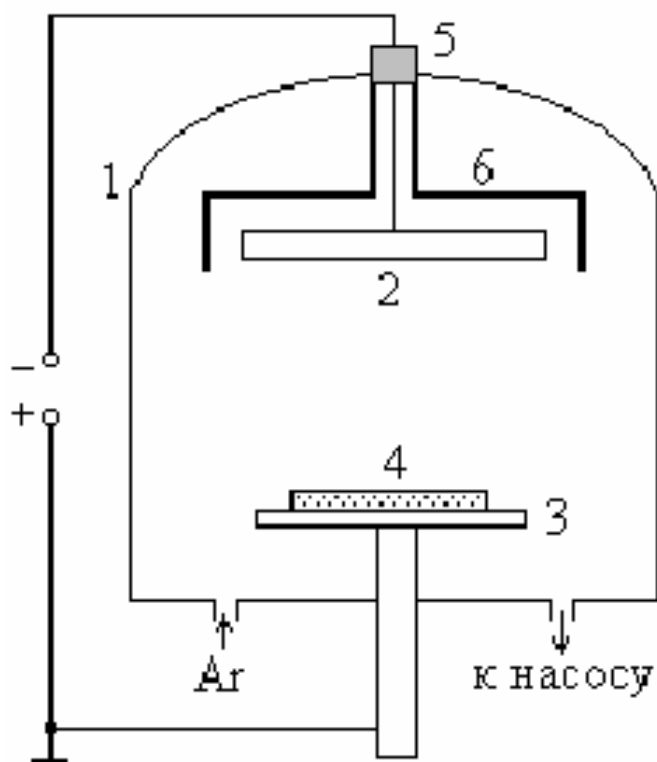


Рисунок 5.2 - Схема установки для катодного распыления

Электрическое поле, существующее между катодом и анодом, ускоряет электроны. Если энергия электронов превышает энергию ионизации молекул рабочего газа, то в результате столкновения электронов с молекулами газа возникает газовый разряд. Однако, если длина свободного пробега электронов становится сравнимой с расстоянием между катодом и анодом, то основная часть электронов будет пролетать межэлектродное пространство без столкновений с молекулами рабочего газа. Газоразрядная плазма погаснет. Эти два фактора и определяют нижний и верхний пределы давлений газа в камере.

5.3 Трехэлектродная система распыления

Для повышения чистоты получаемой на подложке пленки процесс ионно-плазменного распыления необходимо проводить при как можно меньшем давлении рабочего газа. Однако, как уже отмечалось ранее, понижение давления приводит к тому, что при большой длине свободного пробега электронов вероятность их столкновения с атомами рабочего газа становится ничтожно малой, и газовый разряд гаснет. Поэтому для поддержания разряда в камере и обеспечения распыления мишени при низких давлениях необходимы специальные меры.

Одним из вариантов решения проблемы является применение трехэлектродной системы распыления, изображенной на рис. 3. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – термокатод; 2 – анод; 3 – мишень; 4 – подложка; 5 – подложкодержатель. Таким образом, в данной системе имеются три независимо управляемых электрода: термокатод, анод и распыляемая мишень, потенциал которой относительно термокатода составляет несколько киловольт.

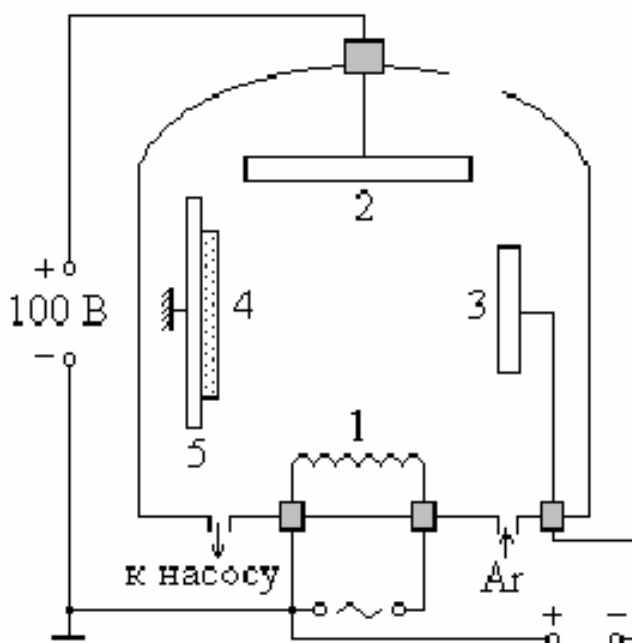


Рисунок 5.3 - Трехэлектродная система распыления

По достижении в камере вакуума порядка 10^{-4} Па термокатод разогревают и в камеру через натекатель подают инертный газ при давлении 0,05 - 1 Па. В результате термоэлектронной эмиссии с катода будут интенсивно испускаться электроны, ускоряющиеся вертикальным электрическим полем. При напряжении между термокатодом и анодом порядка 100 В возникает самостоятельный газовый разряд, при этом разрядный ток достигает нескольких ампер. Мишень, имеющая отрицательный потенциал относительно катода, оттягивает на себя значительную часть ионов, образующихся в газовом разряде, и ускоряет их. В результате бомбардировки мишени ионами происходит ее распыление, и распыленные атомы осаждаются на подложке, формируя тонкую пленку. Такие трехэлектродные системы, в которых электрические цепи разряда и распыления разделены и управляются независимо друг от друга, обеспечивают гибкость управления процессом. Скорость осаждения составляет единицы нанометров в секунду, что в

несколько раз превышает аналогичный показатель для двухэлектродной схемы катодного распыления.

5.4 Реактивное распыление

При реактивном распылении в газоразрядную камеру наряду с рабочим газом (обычно аргоном) добавляется небольшое количество реакционного активного газа (кислорода, азота и др.), в результате чего на подложке образуется пленка из химического соединения, образованного атомами мишени и активного газа. Если, например, мишень изготовлена из алюминия, а в качестве активного газа используется кислород, то на подложке получается пленка из оксида алюминия, если же в камеру добавляется азот, то получится пленка из нитрида алюминия.

Использовать реактивное распыление взамен непосредственного распыления мишени из химического соединения целесообразно тогда, когда коэффициент распыления данного химического соединения (оксида, нитрида и так далее) низкий, либо тогда, когда технологически трудно изготовить массивную мишень из этого соединения. Кроме того, реактивное распыление создает условия для гибкого управления свойствами пленок при создании многослойных структур (например, пленочных конденсаторов).

5.5 Магнетронное распыление

Стремление снизить давление рабочего газа в камере и увеличить скорость распыления мишеней привело к созданию метода магнетронного распыления. Один из возможных вариантов схем магнетронного распылителя представлен на рис. 5.4.

Отличительной особенностью магнетронного распылителя является наличие двух скрещенных полей – электрического и магнитного.

Если из мишени-катода будет испускаться электрон, то траектория его движения будет определяться действием на него этих полей. Под воздействием электрического поля электрон начнет двигаться к аноду. Действие магнитного поля на движущийся заряд приведет к возникновению силы Лоренца, направленной перпендикулярно скорости. Суммарное действие этих сил приведет к тому, что в результате электрон будет двигаться параллельно поверхности мишени по сложной замкнутой траектории, близкой к циклоиде.. Электрон будет двигаться по ней до тех пор, пока не произойдет несколько столкновений его с атомами рабочего газа, в результате которых произойдет их

ионизация, а сам электрон, потеряв скорость, переместиться за счет диффузии к аноду.

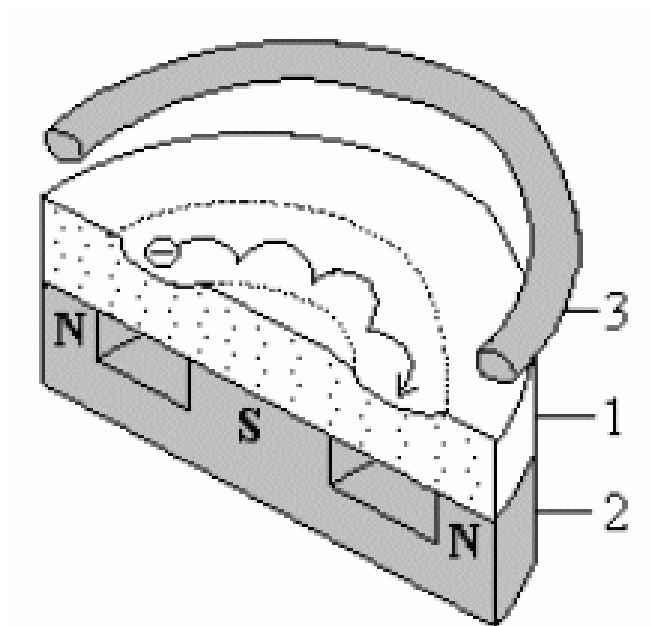


Рисунок 5.4 - Схема установки для магнетронного распыления

1 – мишень, одновременно являющаяся катодом распылительной системы; 2 – постоянный магнит, создающий магнитное поле, силовые линии которого параллельны поверхности мишени; 3 – кольцевой анод. Выше анода располагается подложка (на рисунке не показана), на которой формируется пленка из материала мишени.

Таким образом, замкнутый характер траектории движения электрона резко увеличивает вероятность его столкновения с атомами рабочего газа. Это означает, что газоразрядная плазма может образовываться при значительно более низких давлениях, чем в методе катодного распыления. Значит и пленки, полученные методом магнетронного распыления, будут более чистыми. Другое важное преимущество магнетронных систем обусловлено тем, что ионизация газа происходит непосредственно вблизи поверхности мишени. Газоразрядная плазма локализована вблизи мишени, а не "размазана" в межэлектродном пространстве, как в методе катодного распыления. В результате резко возрастает интенсивность бомбардировки мишени ионами рабочего газа, тем самым увеличивается скорость распыления мишени и, как следствие, скорость роста пленки на подложке (скорость достигает нескольких десятков нм/с).

5.6 Ионно-лучевые методы получения тонких пленок

Тонкие пленки различных материалов можно наносить на подложку, распыляя материал мишени пучком ионов инертных газов. Основные достоинства этого метода нанесения пленок по сравнению с методом ионно-плазменного распыления состоят в следующем:

- возможность нанесения пленок материалов сложного состава с сохранением компонентного состава мишени;
- малое рабочее давление в технологической камере, ограниченное лишь быстротой откачки вакуумной системы, а не условиями поддержания разряда;
- отсутствие электрических полей в области подложки, что особенно важно при нанесении диэлектрических пленок на подложки из проводящих материалов;
- возможность управления зарядами в осаждаемой диэлектрической пленке с помощью электронов, эмиттируемых катодом нейтрализации.

Ионно-лучевой метод наиболее эффективен для нанесения пленок многокомпонентных материалов, различных диэлектриков, магнитных материалов.

Раздел 6. Основы вакуумных технологий

Создание элементов МЭМС невозможно без применения вакуумной техники.

Качество получаемых элементов МНТ во многом определяется предельным вакуумом в рабочей камере или предельным разряжением. В технике вакуумом называют состояние газа, когда его давление ниже атмосферного.

РАССМОТРИМ НА ПРИМЕРЕ НАПЫЛЕНИЯ ПЛЕНОК:

Предельный вакуум, создаваемый в вакуумной системе перед распылением мишени является одним из основных параметров, характеризующий чистоту напылительной установки. Это связано с тем, что остаточные газы находящиеся в рабочей камере во многом определяют чистоту осаждаемого материала и соответственно физические свойства изготавливаемых тонких пленок. При осаждении материала мишени на подложку, также происходит осаждение всех веществ, находящихся в остаточной атмосфере рабочей камеры, что приводит к появлению примесей (атомов других веществ) и «грязи», появлению дефектов и даже структурному изменению напыляемой пленки.

6.1 Основы вакуумных технологий – понятие вакуума, степени вакуума. Число Кнудсена

Вакуум— среда, содержащая газ при давлениях, существенно ниже атмосферного. Характеризуется соотношением между средней длиной свободного пробега λ молекул газа и размером d , характерным для каждого конкретного процесса или прибора (расстояние между стенками вакуумной камеры, диаметр вакуумного трубопровода, расстояние между электродами электровакуумного прибора и т. п.).

$$\lambda = v_{\text{ср}} / Z,$$

$v_{\text{ср}}$ - средняя скорость молекул, Z - число столкновений, испытываемых молекулой за единицу времени.

В зависимости от величины отношения λ/d различают низкий ($\lambda/d < 1$), средний ($\lambda/d \sim 1$), высокий ($\lambda/d > 1$) вакуум. В низком вакууме преобладают столкновения молекул друг с другом, в высоком преобладают столкновения молекул со стенками камеры. В обычных вакуумных установках и приборах

низкому вакууму соответствуют давления $p > 10^{-2}$ Па (1 мм рт. ст.), среднему – от 10^{-2} до 10^{-1} Па (1–10 мм рт. ст.), высокому – $p < 10^{-1}$ Па (10^{-3} мм рт. ст.)

Понятие сверхвысокого вакуума связывается не с величиной отношения λ/d , а со временем τ , необходимым для образования монослоя газа на поверхности твёрдого тела (помещенного в вакуум).

Для количественной оценки вводится число Кнудсена (характеризует степень разрежённости газового потока):

$$Kn = \lambda/L,$$

где L — характерный размер вакуумного объема,
 λ — средняя длина свободного пробега.

Низкий вакуум соответствует $Kn \ll 1$. При этом обмен энергией происходит исключительно между ближайшими молекулами. Такие условия проявляются в виде вязкости газа, а соответствующие процессы называются вязкостными. Из условия изменения режима течения газа принимают $Kn < 0,005$.

Область давлений, когда средняя длина свободного пробега молекул совпадает с характерным размером вакуумного объема, получила название среднего вакуума. В этом диапазоне давлений столкновения молекул со стенками и друг с другом равновероятны. Средний вакуум отвечает $Kn \sim 1$.

В области высокого и сверхвысокого вакуума средняя длина свободного пути молекул много больше размеров вакуумного объема, и молекулы преимущественно сталкиваются со стенками сосуда. В этом случае каждая молекула выступает индивидуально, а процессы в газах называются молекулярными. В высоком вакууме $Kn \gg 1$. В этом случае, при напылении, изображение экрана на пути молекулярного пучка получается отчетливым. Из условия изменения режима течения газа принимают $Kn > 1,5$. Тогда условие существования среднего вакуума можно записать в виде $0,005 < Kn < 1,5$.

6.2 Общая характеристика вакуумных насосов

Для создания в установках требуемой степени разрежения применяют разнообразные вакуумные насосы.

Вакуумные насосы классифицируются по назначению на низковакуумные, средневакуумные, высоковакуумные и

сверхвысоковакуумные, а в зависимости от принципа действия - на механические и физико-химические.

По характеру воздействия на откачиваемые газы – механические насосы разделяются на объемные и молекулярные.

Объемные насосы осуществляют откачку за счет периодического изменения объема рабочей камеры. Конструктивные варианты: поршневые, жидкостно-кольцевые и ротационные. Молекулярные насосы работают за счет передачи молекулам газа количества движения от твердой, жидкой или парообразной быстро движущейся поверхности. Среди них различают водоструйные, эжекторные, диффузионные, молекулярные с одинаковым направлением движения откачивающей поверхности и молекул газа, турбомолекулярные с взаимно перпендикулярным движением твердых поверхностей и откачиваемого газа и т.д.

6.3 Физические принципы объемной откачки (форвакуумные насосы)

В процессе объемной откачки выполняются следующие основные операции:

- 1) всасывание газа за счет расширения рабочей камеры насоса;
- 2) уменьшение объема рабочей камеры и сжатие находящегося в ней газа;
- 3) удаление сжатого газа из рабочей камеры в атмосферу или насос предварительного разрежения.

Наиболее распространенной конструктивной схемой объемных насосов являются ротационные. Ротационные вакуумные насосы имеют несколько конструктивных модификаций, а быстрота откачки составляет от 0,3 до 300 л/с. На рис. 6.1 схематически изображен (в разрезе) такой насос одной из широко распространенных конструкций. Цилиндрический ротор R эксцентрично вращается в цилиндрическом же корпусе с входным и выходным патрубками (в последнем установлен обратный клапан N). В пазах ротора R находятся две пластинки, которые прижимаются пружинами к внутренним стенкам корпуса. Вся система погружена в масло, которое служит смазкой и обеспечивает уплотнение зазоров между внутренними стенками корпуса и деталями ротора. Газ из откачиваемого объема, захваченный в полости A (после того, как верхняя пластинка прошла входное отверстие), при дальнейшем повороте ротора сжимается, пока под его давлением не откроется обратный клапан, и выпускается наружу через масло внешней камеры. Такой процесс повторяется два раза за один оборот ротора.

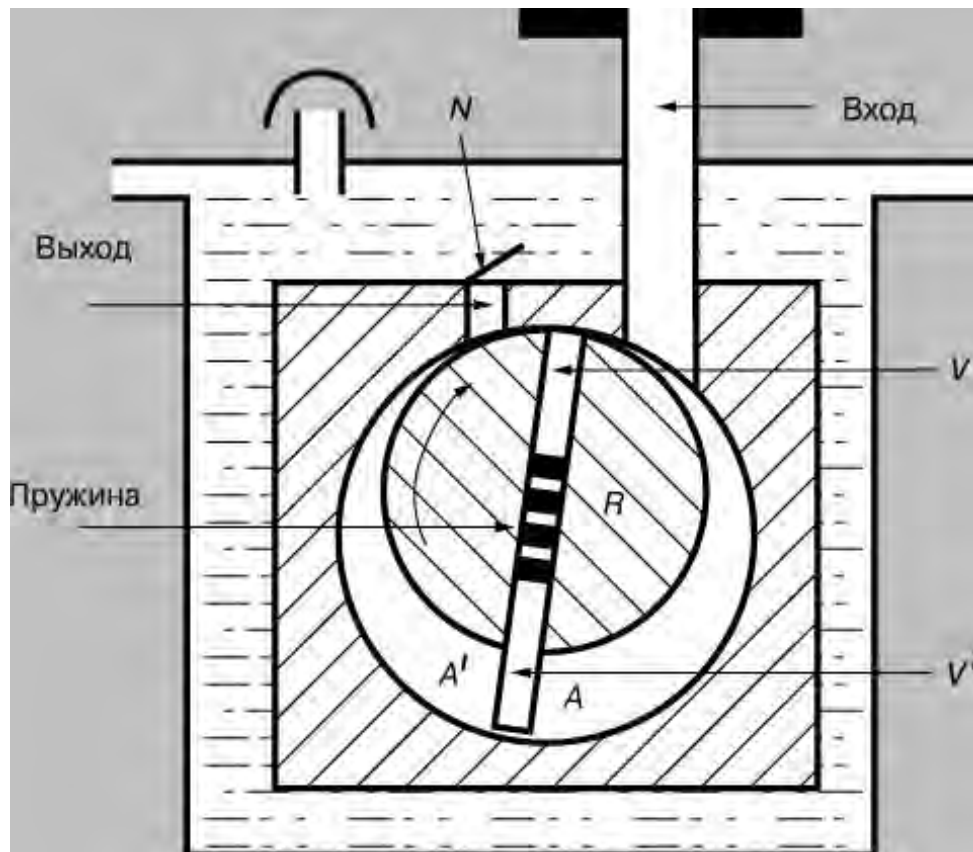


Рисунок 6.1 – Пластинчато-роторный насос в разрезе (упрощенная схема)
 R - цилиндрический ротор; V и V' - подпружиненные пластинки, разделяющие рабочий объем насоса на две части - входную A и выходную A'; N - пружинный обратный клапан в выпускном патрубке.

Для работы с большой быстротой действия при малых степенях сжатия применяют **ротационные вакуумные насосы** с обкатываемыми профилями. Вращение роторов обеспечивается синхронизирующей передачей. К таким насосам относятся двухроторные насосы (насосы Рутса),

За один оборот каждый из роторов дважды перебрасывает объем газа из области высокого вакуума в область высокого давления. В первой позиции поступает газ со стороны впускного отверстия, затем часть его захватывается нижним ротором (вторая позиция). В третьей и четвертой фазах этот объем выталкивается в выпускное отверстие. При этом видно, что в позиции 4 верхний ротор также захватил порцию газа, которая будет удалена в следующей четверти цикла (рис.6.2).

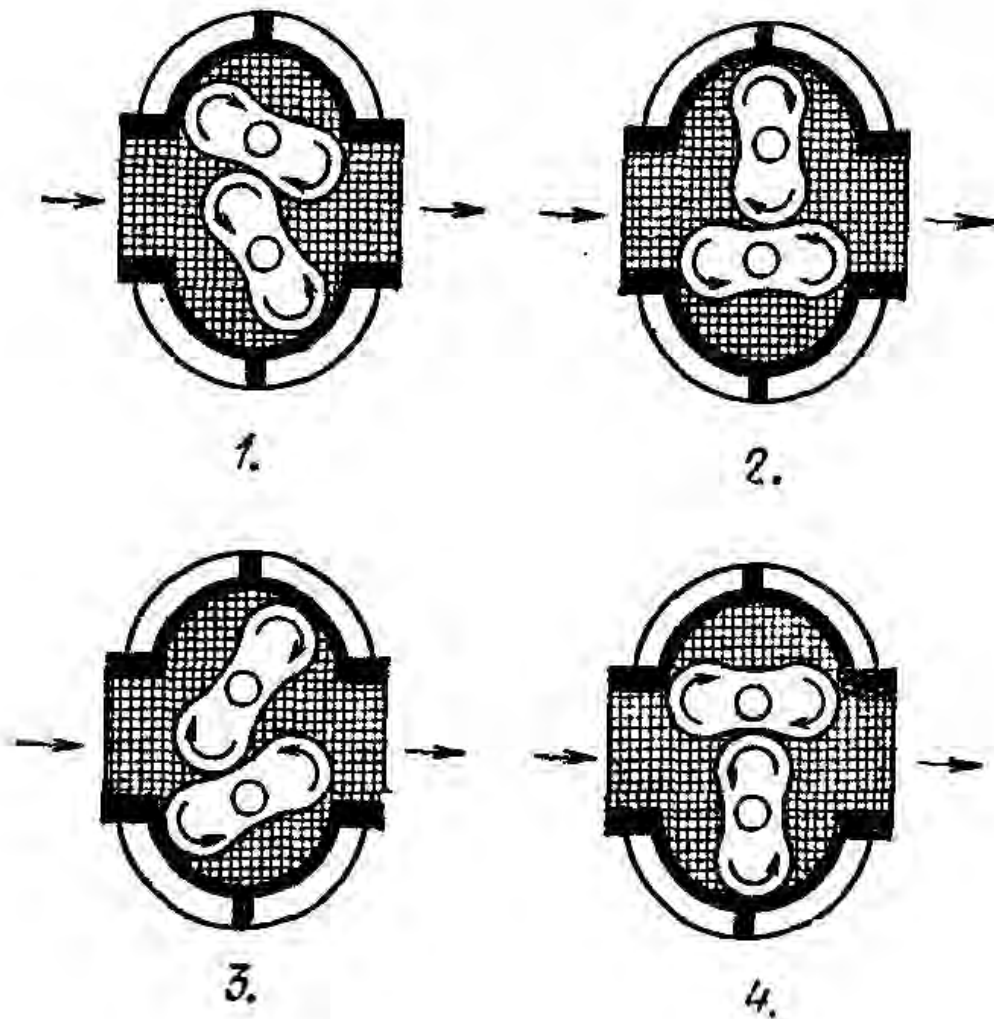


Рисунок 6.2 – Принцип действия двухроторного насоса

В современных насосах два вращающихся навстречу ротора точно подгоняются к друг другу и работают без какой-либо жидкой или внутренней смазки.

Раньше было принято считать, что на выходе подобных насосов необходимо создавать разрежение и использовать еще один механический насос. В современных моделях подобных насосов (англ. название *dry lobe type backing pump*) в этом нет необходимости. Двухроторные насосы при тех же габаритах имеют значительно большую быстроты действия, чем пластинчатые. Быстрота действия современных двухроторных насосов лежит в пределах от 5 до 5000 л/с. Предельное давление одноступенчатых насосов 0,5 Па, двухступенчатых 0,05 Па.

6.4 Высоковакуумные насосы. Физические принципы, лежащие в основе работы турбомолекулярных, криогенных и диффузионных насосов

Для создания высокого вакуума наиболее широко используются 3 типа насосов, 2 из которых относятся к молекулярным насосам и один к физико-химическим.

Турбомолекулярные насосы работают за счет передачи молекулам газа количества движения от твердой, жидкой или парообразной быстродвижущейся поверхности. Наиболее распространены турбомолекулярные насосы с взаимно перпендикулярным движением твердых поверхностей и откачиваемого газа. Теоретическое предельное давление для турбомолекулярных насосов 10^{-10} мм.рт.ст., однако достигается только 10^{-8} мм.рт.ст.. Турбомолекулярные насосы с помощью быстровращающихся поверхностей, которые сообщают сталкивающимися с ними молекулами газа импульс, создают поток газа направленный в сторону насоса предварительной откачки. При этом точки на окружности ротора имеют линейные скорости порядка молекулярных (430 м/с). Поэтому вал таких насосов должен вращаться со скоростью 10 000–60 000 об/мин в зависимости от диаметра насоса.

Криогенные насосы являются вторым, широко используемым типом высоковакуумных насосов, наравне с турбомолекулярными насосами, по принципу действия относятся к физико-химическим.

Рабочими частями криогенных насосов служат охлаждаемые металлические поверхности различной формы (решетки, доски и т.п.). Молекулы откачиваемого газа при контакте с криопанелью конденсируются на них. Насос работает в области низких давлений, при которых длина свободного пробега газа сравнима с размерами рабочей камеры, и молекулы газа долетают до охлаждающих поверхностей без промежуточных столкновений.

Диффузионные паромасляные насосы работают за счет передачи молекулам газа количества движения от парообразной быстродвижущейся поверхности. Принцип действия основан на том, что молекулы паров масла разгонялись до скоростей близким к скорости звука и этот поток «захватывал» и уносил в сторону форвакуумного насоса молекулы откачиваемого газа, см. рис.

Диффузионные насосы отличаются простотой конструкции, высокой надежностью и неприхотливостью, а также относительной дешевизной. Подобные насосы входят в состав вакуумных универсальных постов ВУП-4 (5 и 5М) и др. (рис.6.3).

Предельное давление для диффузионных насосов порядка 10^{-6} Па (при использовании азотных ловушек).

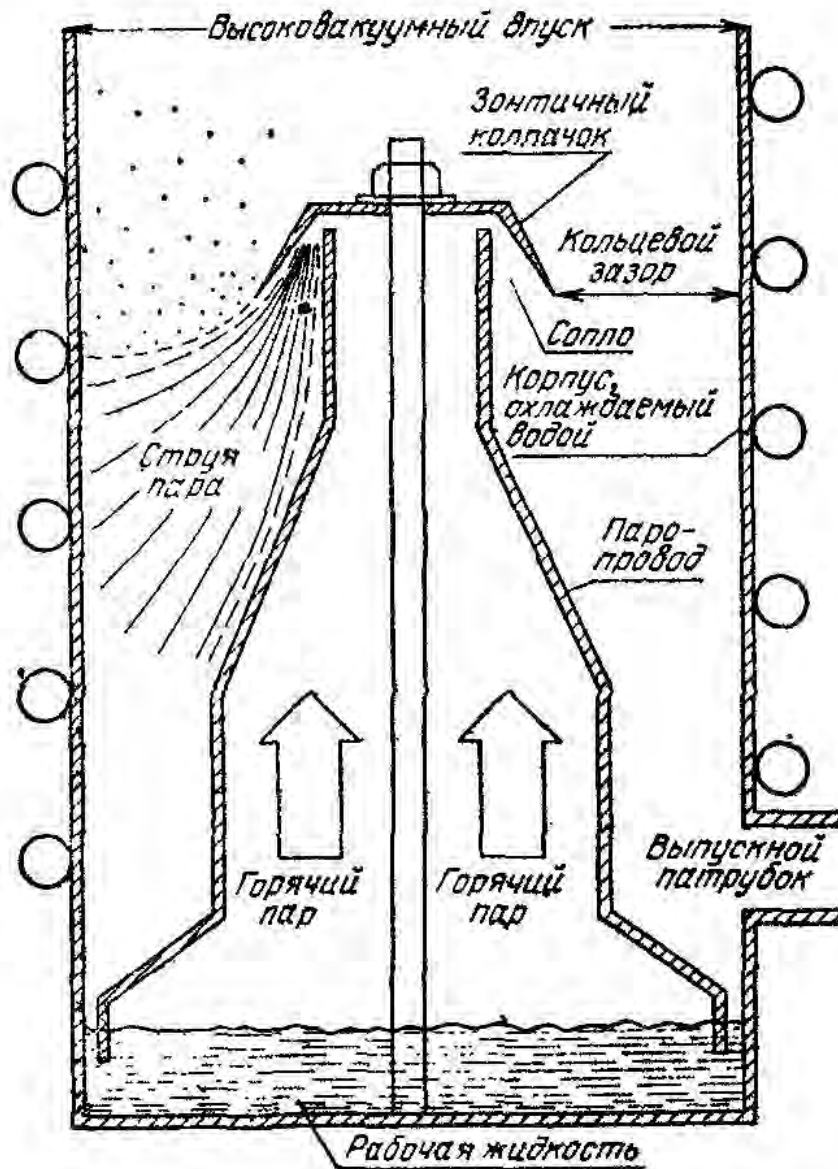


Рисунок 6.3 - Основные элементы диффузионного насоса

Необходимо отметить, что все высоковакуумные насосы работают только в паре с форвакуумным механическим насосом, подключенным к выходу высоковакуумного.

Для получения сверхвысокого вакуума необходимо использование дополнительных насосов (магниторазрядных, титановых и др.)

Раздел 7. Литографические и нелитографические методы в технологии микро- и наносистемной техники

Литография - это процесс формирования элементов микро- и наносистемной техники фотографическими методами.

Сущность литографического процесса состоит в том, что на подложку наносят фоточувствительный слой (резист), а затем его засвечивают через фотошаблон, вытравливают канавки, напыляют проводящие и диэлектрические пленки и т.д. до изготовления элемента микро- и наносистемной техники или микросхемы. По используемому для засветки резиста виду излучения литография подразделяется на фотолитографию (засветка ультрафиолетом) рентгенолитографию (засветка рентгеновским излучением), электронную и лазерную литографии (соответственно засветка резиста проводится электронами или лазерным излучением и т.д.). Засветку можно производить перемещающимся лучом (проекционная сканирующая литография) или посредством наложения шаблона (контактная литография). В настоящее время распространилось значительное количество как самостоятельных, так и комбинированных литографий.

7.1 Основы фотолитографии

7.1.1 Методы оптической литографии

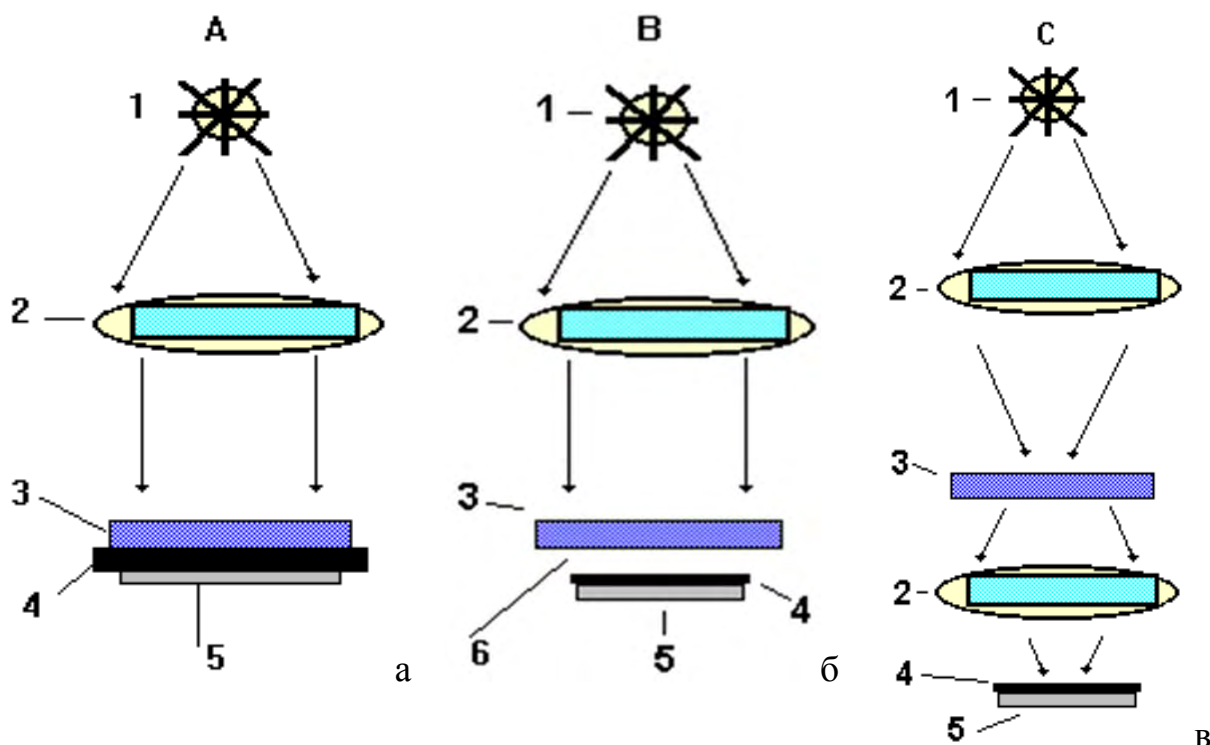
Основными методами оптического экспонирования являются контактный, бесконтактный и проекционный.

Контактная печать. При контактной печати (см. рис. 7.1, а) пластина кремния, покрытая резистом, находится в непосредственном физическом контакте со стеклянным фотошаблоном.

Вследствие тесного контакта между резистом и шаблоном при контактной печати достигаются очень высокие значения разрешения. В пленке позитивного резиста толщиной 0,5 мкм достаточно легко можно воспроизвести элементы схемы размером 1 мкм.

Проблемы, возникающие при контактной печати, связаны с наличием загрязнений на поверхности кремниевой пластины. Кремниевая пылинка на пластине может привести к повреждению поверхности шаблона в момент его соприкосновения с пластиной. Поврежденный участок шаблона затем воспроизводится как дефектный топологический рисунок на всех других

пластинах, при экспонировании которых использован этот шаблон. Каждая пластина добавляет свои собственные повреждения поверхности шаблона.



1- источник света, 2- оптическая система, 3- шаблон, 4- фоторезист, 5- кремниевая пластина, 6-зазор

Рисунок 7.1 - Схемы оптического экспонирования: контактный (а), бесконтактный (б) и проекционный (в)

Метод бесконтактного экспонирования (см. рис. 7.1, б) похож на метод контактной печати, за исключением того, что во время экспонирования между пластиной и шаблоном поддерживается небольшой зазор шириной 10-25 мкм. Этот зазор уменьшает (но не устраняет) возможность повреждения поверхности шаблона. При бесконтактной печати величина разрешения составляет 2-4 мкм.

Проекционная печать (см. рис. 7.1, в) позволяет полностью исключить повреждения поверхности шаблона. Изображение топологического рисунка шаблона проецируется на покрытую резистом пластину, которая расположена на расстоянии нескольких сантиметров от шаблона. Для достижения высокого разрешения отображается только небольшая часть рисунка шаблона. Это небольшая отражаемая область сканируется или перемещается по поверхности пластины. В сканирующих проекционных устройствах печати шаблон и пластина синхронно перемещаются. С помощью этого метода достигается

разрешение порядка 1,5 мкм. Проекционные устройства печати, в которых изображение на шаблоне перемещается над поверхностью пластины, называют системами с непосредственным перемещением по пластине. При использовании этих устройств печати шаблон содержит топологию одного кристалла большого размера или нескольких кристаллов малых размеров, которые увеличены до десяти раз. Изображение этой топологии или структуры уменьшается и проецируется на поверхность пластины. После экспонирования одного элемента кристалла пластина сдвигается или перемещается на столике с интерферометрическим управлением по осям ХУ к следующему элементу одного кристалла, и процесс повторяется. С помощью уменьшающих проекционных фотоштампов можно получить разрешение ~1 мкм.

7.1.2 Фоторезист. Негативные и позитивные фоторезисты

Фоторезист (от фото и англ. resist) — полимерный светочувствительный материал. Наносится на обрабатываемый материал в процессе фотолитографии с целью получить соответствующее фотошаблону расположение окон для доступа травящих или иных веществ к поверхности обрабатываемого материала.

Экспонирование производится в ультрафиолетовом диапазоне спектра (фотолитография). Воздействие либо разрушает полимер (позитивный фоторезист), или, наоборот, вызывает его полимеризацию и понижает его растворимость в специальном растворителе (негативный фоторезист). При последующей обработке происходит травление в «окнах», образованных засвеченными (позитивный фоторезист) или незасвеченными (негативный фоторезист) участками полимера.

В качестве *негативного резиста* при оптической литографии применяют циклополиизопреновый полимер, смешанный с фоточувствительным соединением. Сенсibilизатор, или фотоинициатор активируется при поглощении энергии в диапазоне длин волн 200-450 нм. Активированный сенсibilизатор передает энергию молекулам полимера, что способствует образованию поперечных связей между цепочками полимера.

Увеличение молекулярного веса полимера приводит к нерастворимости резиста в проявителе. Многочисленные реакции, снижающие растворимость резиста, происходят при каждом поглощении сенсibilизатором фотона. Кислород препятствует протеканию реакций полимеризации, поэтому экспозицию поверхности негативного резиста часто проводят в атмосфере азота.

При проявлении пленка негативного резиста разбухает, а его неэкспонированные области с низким молекулярным весом растворяется в проявителе. Этот эффект разбухания пленки уменьшает разрешающую способность негативных резистов. Как правило, минимальный разрешаемый размер элемента в три раза больше толщины пленки негативного резиста.

Позитивные резисты также состоят из основного полимерного материала и фотосенсибилизатора, но абсолютно по-другому реагируют на воздействие экспонирующего облучения. Сенсибилизатор нерастворим в водном растворе проявителя и, следовательно, предотвращает растворение основного полимерного материала.

В области экспонирования сенсибилизатор поглощает энергию облучения и становится растворимым в водной среде. Различие в растворимости экспонированных и неэкспонированных участков резиста приводит к проявлению изображения в позитивном резисте. В отличие от негативного резиста проявитель не пропитывает всю пленку и она не набухает. В результате этого разрешающая способность позитивных резистов выше, чем негативных.

Сравнение резистов.

Негативные резисты, обладая меньшей разрешающей способностью по сравнению с позитивным, имеют более высокую чувствительность и их использование позволяет экспонировать большее количество пластин в час. Позитивные резисты, хотя и обладают более высокой разрешающей способностью, проявляются значительно медленнее, что приводит к уменьшению производительности и увеличению стоимости ИС. Следовательно, при определении типа используемого резиста необходимо делать выбор между разрешением и производительностью.

7.1.3 Методы нанесения фоторезистов

Наносят слой фоторезиста на подложки в обеспыленной среде, соблюдая технологические режимы. Используемый фоторезист должен соответствовать паспортным данным. Перед употреблением его необходимо профильтровать через специальные фильтры, а в особо ответственных случаях) обработать на центрифуге при частоте вращения 10 - 20 тыс. об/мин в течение нескольких часов. Это делают для того, чтобы удалить из фоторезиста инородные микрочастицы размером менее 1 мкм, которые могут привести к браку фоторезистивного слоя. Кроме того, необходимо проверить вязкость фоторезиста и довести ее до нормы.

Для нанесения слоя фоторезиста на подложки используют *методы центрифугирования, пульверизации, электростатический, окунания, полива, накатку пленки сухого фоторезиста.*

Методом центрифугирования, наиболее широко используемым в технологии, на несложном оборудовании наносят слои фоторезиста, толщина которых колеблется в пределах $\pm 10 \%$. При этом методе на подложку, которая устанавливается на столике центрифуги и удерживается на нем вакуумным присосом, фоторезист подается капельницей-дозатором. Когда столик приводится во вращение, фоторезист растекается тонким слоем по поверхности подложки, а его излишки сбрасываются с нее и стекают по кожуху.

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, осаждающийся 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: возможность изменения толщины слоя фоторезиста в широких пределах: однородность слоев по толщине; отсутствие утолщений по краям подложек; нанесение фоторезиста на профилированные подложки (в малейшие углубления и отверстия): сравнительно малый расход фоторезиста; высокая производительность и автоматизация процесса; хорошая адгезия слоя к подложкам (лучшая, чем при центрифугировании).

Недостатки этого метода состоят в том, что при его использовании необходимо специально подбирать растворители, так как слой фоторезиста не должен стекать по подложкам. Кроме того, следует тщательно очищать фоторезист и используемый для пульверизации газ.

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 создают 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 подложке на ней.

Этот метод имеет высокую производительность и позволяет наносить слой фоторезиста на подложки большой площади. Недостаток его - трудность стабилизации процесса и сложность оборудования.

Методы **окунания** и **полива** являются простейшими среди всех методов нанесения слоя фоторезиста.

При окунании подложки погружают на несколько секунд в ванну с фоторезистом, а затем с постоянной скоростью вытягивают из нее в вертикальном положении специальными подъемными устройствами и сушат, установив вертикально или наклонно.

Полив фоторезиста на горизонтально расположенные подложки обеспечивает лучшую по сравнению с окунанием однородность слоя по толщине, но при этом методе неизбежны утолщения слоя фоторезиста по краям.

Окунание и полив применяют для нанесения слоя фоторезиста на подложки больших размеров, а также его толстых слоев (до 20 мкм) на обе стороны подложек. Недостаток этих методов - неоднородность слоя фоторезиста по толщине.

Общим недостатком нанесения жидких фоторезистов является трудность получения сплошных слоев заданной толщины.

Накатка пленки сухого фоторезиста 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.

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

7.1.4 Основные параметры фоторезистов

Светочувствительность S , $\text{см}^2/(\text{Вт} \cdot \text{с})$, - это величина, обратная экспозиции, т. е. количеству световой энергии, необходимой для облучения фоторезиста, чтобы перевести его в нерастворимое (негативный) или растворимое (позитивный) состояние.

Фоторезисты характеризуются также пороговой светочувствительностью, определяемой началом фотохимической реакции.

Светочувствительность и пороговая светочувствительность фоторезиста зависят от толщины его слоя, а также состава и концентрации проявителя. Поэтому, говоря о значении светочувствительности и пороговой

светочувствительности, учитывают конкретные условия проведения процесса фотолитографии.

Разрешающая способность фоторезиста определяется числом линий равной ширины, разделенных промежутками такой же ширины и уместающихся в одном миллиметре. Следует различать разрешенную способность фоторезиста и разрешающую способность процесса фотолитографии, которая зависит от режимов травления. На практике необходимо ориентироваться на разрешающую способность фотолитографического процесса.

При эпитаксиально-планарной технологии разрешающая способность фотолитографии — это предельное количество линий в одном миллиметре, вытравленных в слое диоксида кремния толщиной 0,5 — 1,0 мкм через промежутки равной ширины. Разрешающая способность лучших современных фоторезистов достигает 1500 — 2000 линий/мм. Разрешающая способность отечественных фоторезистов ФП-383 и ФП-РН-7 составляет 400- 500 линий/мм, что позволяет получать контактной и проекционной фотолитографией рисунки элементов, соответственно имеющие размеры 1,25 - 1,5 и 0,5- 0,6 мкм.

Кислотостойкость — это способность слоя фоторезиста защищать поверхность подложки от воздействия кислотного травителя. Критерием кислотостойкости является время, в течение которого фоторезист выдерживает действие травителя до момента появления таких дефектов, как частичное разрушение, отслаивание от подложки, локальное точечное расстраивание слоя или подтравливание его на границе с подложкой,

Стойкость фоторезиста к химическим воздействиям зависит не только от состава, но и от толщины и состояния его слоя. Поэтому кислотостойкость оценивают фактором травления:

$$K = h/x$$

(где h - глубина травления; x - боковое подтравливание).

Таким образом, чем меньше боковое подтравливание при заданной глубине травления, тем выше кислотостойкость фоторезиста.

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 потоке проявителя. В большинстве случаев адгезию считают удовлетворительной, если слой фоторезиста 20x20 мкм² отрывается за 20 мин. Об адгезии фоторезиста к

подложке можно судить по углу смачивания, т. е. состоянию поверхности подложки.

Стабильность свойств фоторезистов характеризуется их сроком службы при определенных условиях хранения и эксплуатации и обеспечение ее является одной из важнейших проблем производства изделий микро и наносистемной техники.

7.2 Основы электронно-лучевой литографии

По мере того как тенденция к миниатюризации продолжала стимулировать разработку всё новых поколений устройств, фотолитография достигла естественного предела, обусловленного дифракцией света. По аналогии с фотолитографией были изобретены новые методы, такие как литография с освещением далёким ультрафиолетом и электронно-лучевая литография, которые позволяли создавать нанометровые структуры.

Электронно-лучевая литография (ЭЛ) - метод изготовления субмикронных и наноразмерных топологических элементов посредством экспонирования электронным лучом электрически чувствительных поверхностей. Метод схож с фотолитографией, но использует электроны вместо фотонов. В настоящее время электронная литография осваивает размеры из интервала 0.04 - 0.08 мкм.

Существуют две основные возможности использования электронных пучков для облучения поверхности пластины с целью нанесения рисунка. Это одновременное экспонирование всего изображения целиком и последовательное экспонирование (сканирование) отдельных участков рисунка.

Проекционные системы, как правило, имеют высокую производительность и более просты, чем сканирующие системы. Носителем информации об изображении является маска (шаблон). Изображение с шаблона передается на пластину лучом электронов.

Сканирующие системы управляются вычислительной машиной, которая задает программу перемещения сфокусированного пучка электронов для нанесения рисунка, исправляет эффекты дисторсии и расширения пучка и определяет положение пластины.

7.2.1 Проекционные системы

Электронно-лучевая проекционная литография основана на экспонировании одиночного изображения больших размеров для получения

копий шаблона с линиями субмикронной толщины. Шаблон изготавливается заранее методом сканирующей электронной литографии. Разработаны две разновидности лучевых проекционных систем.

Система с точной передачей размеров

Система с уменьшением изображения

Эти установки имеют высокое пространственное расширение и точность совмещения, приближающиеся к 0,1 мкм. Схема установки для электронно-лучевой проекционной литографии представлена на рис.7.2.

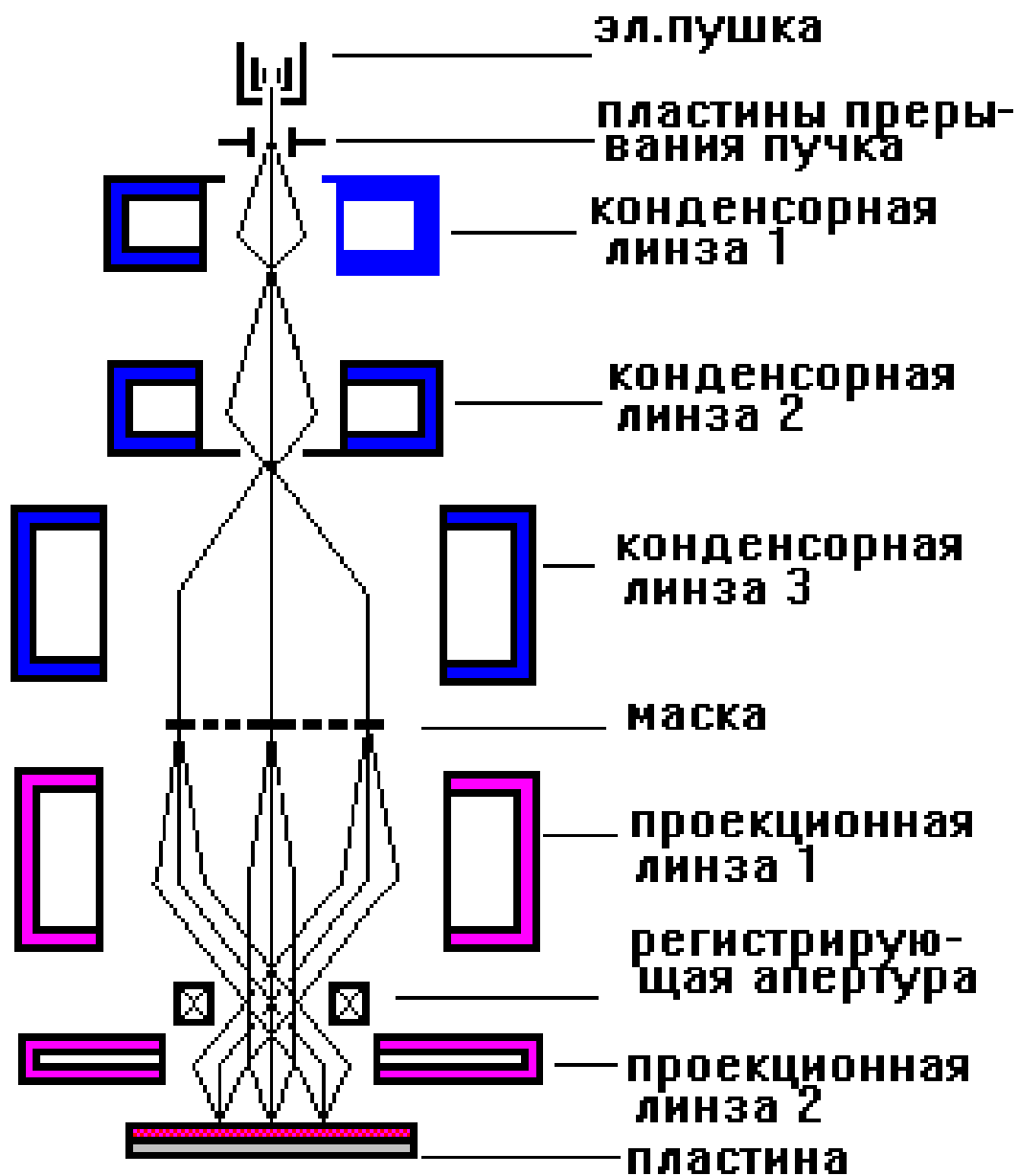


Рисунок 7.2 - Схема установки для электронно-лучевой проекционной литографии

Возможности применения электронно-лучевой техники в производстве микросхем весьма широки. Ограничения на ширину линий и плотность упаковки определяются не столько работой электронного пучка, сколько разрешающей способностью резиста и возможной точностью совмещения шаблона с пластиной.

Электронно-лучевая литография для изготовления шаблонов имеет явные преимущества даже в тех случаях, когда для совмещения шаблона с подложкой и экспонирования резиста применяется способ фотолитографии. ЭЛЛ обеспечивает превосходное разрешение линий оригинала, давая возможность улучшить качество шаблона. Время, которое уходит на кодирование чертежа шаблона в цифровой вид и последующее его изготовление под управлением ЭВМ, значительно меньше времени, которое требуется для процесса фотоумножения. Дополнительным преимуществом является то, что при изменении чертежа достаточно просто модифицировать программу ЭВМ.

7.2.2 Сканирующая электронно-лучевая литография

Существует два основных способа перемещения пучка:

1. Растровый способ перемещения.

Пучок сканируется по всей области кристалла и для создания нужного рисунка включается и выключается в определенные моменты времени. При растровом способе предъявляются менее жесткие требования к системе отклонения пучка.

2. Векторный способ перемещения.

Пучок перемещается только в ту область, где необходимо провести экспонирование. Как правило, наносимый рисунок разлагается на ряд простейших фигур. Векторное сканирование эффективнее, но требует использования совершенной отклоняющей системы.

Электронный луч попадает на многослойную систему, состоящую из электронного резиста, металлической пленки и пластины, располагающихся на подвижном столике (см.рис.7.3).

В качестве резиста обычно используют позитивные резисты, полученные на основе полиметиметакрилата (ПММА). Для позитивных резистов экспонирование электронным пучком вызывает уменьшение его молекулярного веса при разрыве связей между молекулами, увеличивая их растворимость. Для негативных - облучение стимулирует образование поперечных связей в молекулах полимера. В результате образуется сложная слаборастворимая

трехмерная молекулярная структура с большой плотностью. Разбухание негативных резистов ограничивает разрешающую способность до 1 мкм. Для позитивных - она составляет 0.1 мкм.

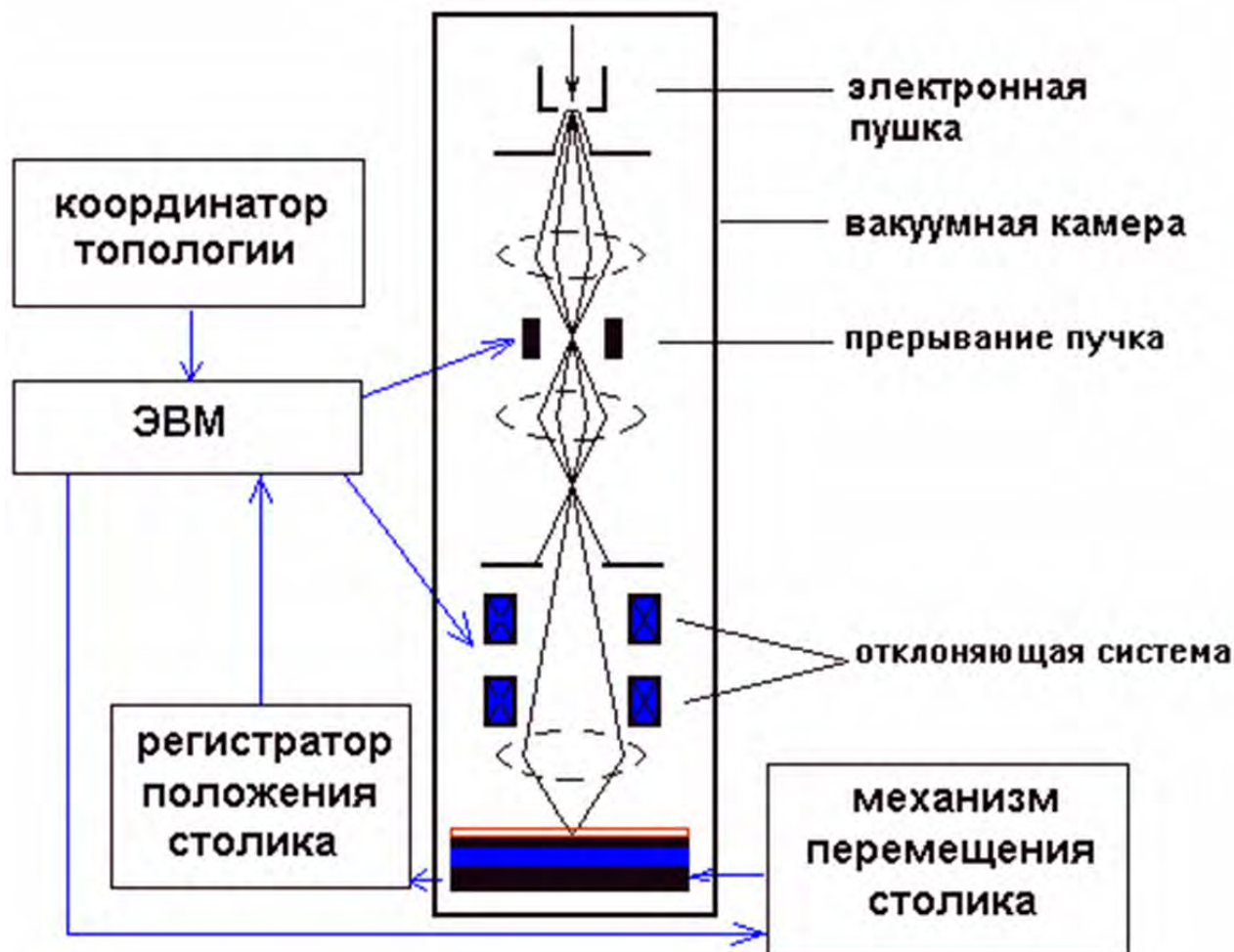


Рисунок 7.3 - Схема сканирующей системы для электронно-лучевой литографии

Разрешающая способность электроннолитографии ограничивается:
 конечным диаметром электронного луча и рассеянием электронов в слое резиста;

ограничения электронной оптики, наличие сферической аберрации и теплового разброса поперечных скоростей электронов приводит к увеличению диаметра электронного пучка;

мощность, вкладываемая в пучок, ограничена испарением электронорезиста;

яркость источников электронов конечна и имеет Гауссовское распределение в пространстве;

скорость прецизионного сканирования ограничена индуктивностью и емкостью электромагнитной отклоняющей системы.

7.3 Основы рентгеновской литографии

Рентгеновская литография является разновидностью оптической бесконтактной печати, в которой длина волны экспонирующего облучения лежит в диапазоне 0.4 - 5 нм. Несмотря на то, что при рентгеновской литографии используется бесконтактная экспонирующая система, проявление дифракционных эффектов уменьшено за счет малой длины волны рентгеновского излучения.

Основная причина разработки метода рентгеновской литографии заключалась в возможности получения высокого разрешения и в то же время высокой производительности оборудования. Кроме того, за счет малой величины энергии мягкого рентгеновского излучения уменьшается проявление эффектов рассеяния в резистах и подложке, следовательно, нет необходимости в коррекции эффектов близости, которые возникают при электронолитографии.

Поскольку рентгеновские лучи практически не поглощаются загрязнениями, состоящими из компонентов с малым атомным номером, то наличие загрязнений на шаблоне не приводит к возникновению дефектов рисунка на резисте. Кроме того, вследствие низкого поглощения рентгеновского излучения рентгеновский резист большой толщины может быть однородно экспонирован на всю толщину, в результате чего в его объеме у окон формируются вертикальные стенки, точно повторяющие рисунок шаблона. Рентгеновская литография обеспечивает наилучшие условия для достижения субмикронного разрешения при высокой производительности обработки пластин. При использовании существующих резистов и рентгеновских источников пластины полностью могут быть экспонированы за 1 минуту с разрешением <0.5 мкм. Суть метода представлена на рисунке 7.4.

Электронная пушка генерирует электронный пучок, фокусируемый на охлаждаемой водой мишени (часто используется палладиевая мишень). Напряжение на аноде составляет 25 кВ, потребляемая мощность 4-6 кВт. В результате анод испускает рентгеновские лучи, которые через бериллиевое окно попадают в камеру экспонирования. Подложка вместе с шаблоном загружаются в камеру экспонирования (шлюзовую камеру), заполненную гелием, имеющим малое значение коэффициента поглощения рентгеновского излучения. По мере необходимости образец извлекается из камеры для проведения процессов совмещения с шаблоном. Между шаблоном и подложкой устанавливается зазор около 40 мкм.

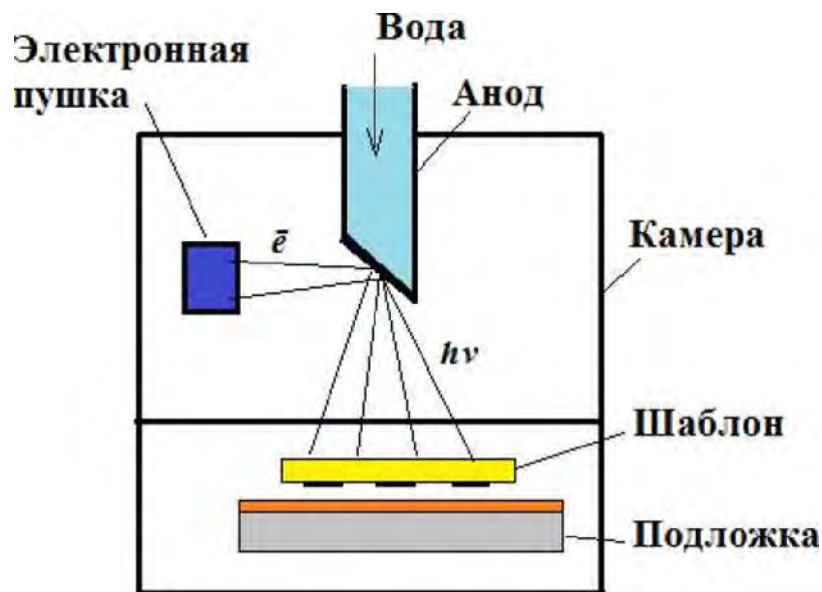


Рисунок 7.4.- Схема реализации рентгенолитографии

Достоинства рентгенолитографии состоят в следующем:

- 1) увеличивается разрешающая способность;
- 2) отсутствует избирательность фоторезиста;
- 3) нет контакта фоторезиста с фотошаблоном;
- 4) ослабляются отражательные эффекты;
- 5) процесс литографии не требует вакуума;
- 6) процесс нечувствителен к загрязнениям;
- 7) мала стоимость литографического процесса.

Недостатки рентгенолитографии:

- 1) наличие рентгеновского излучения предъявляет повышенные требования к помещению и обслуживающему персоналу;
- 2) элементы микросхем, механические напряжения или дефекты могут выступать в роли точечных диафрагм, изменяющих ход лучей в виде выпуклой или вогнутой подушки (дисторсия);
- 3) возможно только теневое экспонирование.

7.4 Основные нелитографические методы в технологии микро- и наносистемной техники

7.4.1 Наноимпринтинг

Концепция наноимпринтинга проста и во многом напоминает классическую технику горячего тиснения полимеров. Резист из

термопластичного полимера наносится на плоскую поверхность субстрата и нагревается выше его температуры стеклования (T_g). Затем сверху под давлением опускается жёсткая печать с микро- или наноразмерным рельефным рисунком. Образец охлаждается ниже T_g полимера, после чего давление снимается. Подвергшаяся такому воздействию полимерная плёнка запечатлеват полную реплику печати. При другом подходе используются УФ-отверждающийся резист и прозрачная кварцевая печать, что даёт возможность осуществлять процесс «запечатления» (импринтинга) при комнатной температуре. Вследствие того, что печать не может полностью вытеснить полимер, его тонкий остаточный слой всегда остаётся между печатью и субстратом. В тех приложениях, для которых наличие остаточного слоя нежелательно, он убирается реактивным ионным травлением (см.рис.7.5).

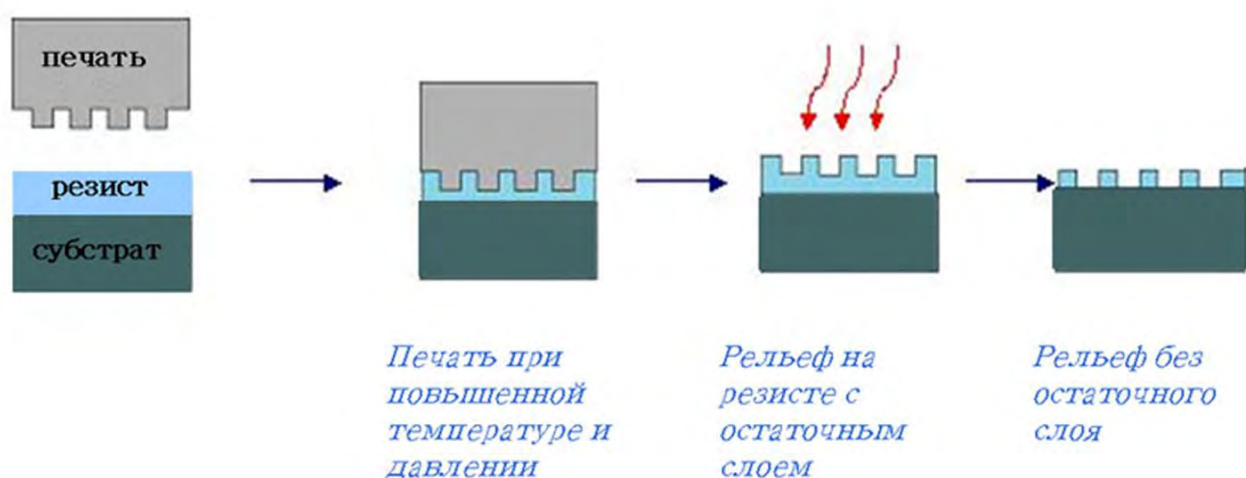


Рисунок 7.5 - Схема проведения наноимпринтинга

7.4.2 Методы, использующие сканирующие зонды

Нанотехнологические подходы, использующие сканирующие зонды, базируются на научном фундаменте и технических приемах, разработанных для сканирующей туннельной микроскопии и атомно-силовой микроскопии. В их основе лежит возможность позиционирования с высокой точностью атомарно острого зонда вблизи поверхности образца.

В сканирующем туннельном микроскопе эта идея реализуется следующим образом: Металлический зонд, обычно изготавливаемый из вольфрама, закрепляют в держателе, пространственное положение которого регулируется тремя пьезоэлементами с помощью подаваемого на них управляющего напряжения. Зонд подводят к образцу на расстояние, обеспечивающее протекание туннельного тока, и пьезоэлементами,

задающими его положение в плоскости x, y , сканируют вдоль поверхности. При этом системой обратной связи протекающий туннельный ток поддерживают постоянным, меняя соответствующим образом приложенное напряжение U . Зависимость $U(x, y)$ отражает атомный рельеф поверхности, если ее электронные свойства (работа выхода) однородны. Локальное изменение работы выхода, характерное для образцов, состоящих из разнородных по своим свойствам атомов, учитывается с помощью дополнительной малой модуляции зазора между зондом и анализируемой поверхностью (рис.7.6).

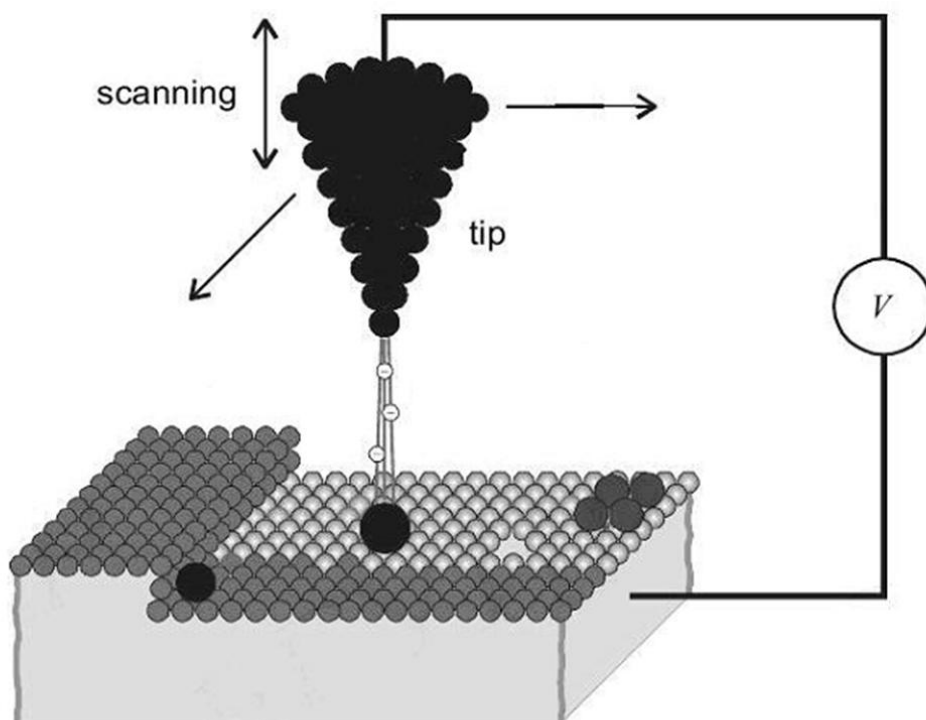


Рисунок 7.6 - Относительное расположение зонда и подложки в сканирующем туннельном микроскопе

Ограничением метода является необходимость хороших электропроводящих свойств исследуемого материала, для того чтобы обеспечить протекание достаточного для регистрации туннельного тока. В атомной силовой микроскопии вместо туннельного тока для анализа поверхности регистрируются силы межатомного взаимодействия в зазоре зонд-подложка.

Контролируя возмущение, создаваемое зондом у поверхности образца, возможно осуществлять управляемую локальную модификацию этой поверхности с атомным разрешением. Этому способствуют экстремальные условия, которые можно реализовать у острия зонда, а именно— электрические поля напряженностью до 10^9 В/м.

Манипулирование индивидуальными атомами – атомная инженерия, безмасочное локальное окисление и осаждение материалов, низкоэнергетическая электронно-лучевая литография – реализованы с использованием сканирующих зондов. Преимущества использования зондовых методов модификации материалов включают не только высокую локальность воздействия, но и возможности непосредственной визуализации результата воздействия и даже локальных электрических измерений с использованием того же самого зонда.

7.4.3 Методы, основанные на волоконных технологиях

Изделия из стекла с малым поперечным сечением в виде определенной микроструктуры и технология их изготовления известны достаточно давно (микроканальные пластины, рентгеношаблоны из стекловолокна, устройства волоконной оптики). Суть стекловолоконной технологии заключается в спекании пучка стеклянных волокон (полых или сплошных), различающихся избирательностью к травлению по отношению к растворителю, вытягивании этого пучка до требуемого поперечного размера, разрезании вытянутой части пучка на куски и вытравливании затем из куска растворимых волокон. Укладка волокон в пучок осуществляется таким образом, что нерастворимые волокна образуют в сечении пучка структуру (топологию) изготавливаемой микроструктуры в некотором масштабе.

Так как для изделий микромеханики характерно наличие отверстий и поверхностей различных конфигураций, требуется подбор материалов и геометрии волокон. Данные процессы сборки пучка и его вытягивания не являются тривиальными, но позволяют изготавливать детали с минимальными поперечными размерами отверстий до 0,2 мкм при высоте (глубине, длине) от 100 мкм. Особо следует отметить возможность изготовления деталей с винтообразными поверхностями путем скручивания вытянутого пучка вокруг его оси. Такие поверхности, как известно, характерны для винтов, червячных и косозубых колес и принципиально не могут быть реализованы с помощью LIGA-технологии.

В заключение в числе самостоятельных литографий следует отметить лазерную литографию, реализуемую как по принципу фотолитографии, так и по принципу безрезистивной литографии. При безрезистивной литографии роль резиста выполняет покрытие (чаще графит), выжигаемое лазером или электронным лучом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ремпель, А. А., Валеева, А.А. Материалы и методы нанотехнологий : учеб. пособие / А.А. Ремпель, А.А. Валеева.— Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015.— 136 с.
2. Лапшинов, Б.А. Технология литографических процессов. Учеб. пособ. М.: МИЭМ, 2011.- 95 с.
3. Агеев, О.А., Федотов, А.А., Смирнов, В.А. Методы формирования структур элементов нанoeлектроники и наносистемной техники: Учебное пособие/ О.А.Агеев, А.А. Федотов, В.А. Смирнов.- Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 72 с.
4. Раскин, А. А. Прокофьева, В. К. Технология материалов микро-, опто- и нанoeлектроники : учебное пособие, ч.1 /А. А. Раскин, В. К.Прокофьева – 2-е изд. - М: Бином, 2010. – 164 с.
5. Орликов, Л.Н. Технология материалов и изделий электронной техники: Учебное пособие /Л.Н. Орликов.- Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. - 382 с.
6. Андриевский, Р.А., Рагуля, А.В. Наноструктурные материалы/ Р.А.Андриевский., А.В Рагуля - М.: Изд.центр «Академия», 2005.- 192 с.
7. Ануфриенко, В.В. Процессы и оборудование фотолитографической обработки/ В.В. Ануфриенко. - М.: МИЭТ, 1998 – 68 с.
8. Березин, А.С. Технология и конструирование интегральных микросхем / А.С.Березин, О.Р. Могапкина – Москва: Радио и связь, 1992. – 432 с.
9. Достанко, А. П. Технология производства ЭВМ : учебник / А. П. Достанко, М. И. Пикуль, А. А. Хмыль. – Минск: Высшая школа, 1994. – 346 с.
10. Розанов, Л.Н. Вакуумная техника: Учеб. для вузов по спец. «Вакуумная техника» /Л.Н.Розанов. – Москва: Высшая школа, 1990. – 320 с.
11. Процессы микро- и нанотехнологии / Т.И. Данилина [и др.]; - Томск: ТУСУР, 2005. - 315 с.
12. Гуртов, В. А. Микроэлектромеханические системы / В. А. Гуртов, М. А. Беляев, А. Г. Бакшеева. – Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2016. – 142 с.
13. Борисенко, В. Е. Нанoeлектроника : учеб. пособие / В. Е. Борисенко, А. И. Воробьева, Е. А. Уткина. – М. : Бином, 2009.

II. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Перечень тем практических занятий

1. Примеры использования локального зондового окисления для создания наноструктур и элементов наноэлектроники.
2. Исследование нанотрубок методами сканирующей электронной микроскопии и микроанализа.
3. Этапы производства пластин из слитков монокристаллического кремния.
4. Особенности технологического маршрута изготовления интегральных схем на основе GaAs.
5. Селективные и полирующие травители. Лимитирующие стадии травления.
6. Устройство установки молекулярно-лучевой эпитаксии.
7. Механизмы окисления. Классификация методов окисления и получаемых окислов.
8. Расчет глубины залегания р-п перехода.
9. Распределение примеси при диффузии из ограниченного и бесконечного источника.
10. Способы нанесения фоторезистов.
11. Плазменные методы в технологии наноструктур.
12. Функции основных элементов вакуумных систем.
13. Физические принципы контроля толщины напыляемых пленок.
14. Методы синтеза порошков для нанокерамики.
15. Технология кремниевой объёмной и поверхностной микрообработки.
16. Расчет вакуумных систем

III. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

Перечень вопросов, выносимых на экзамен:

1. Предмет дисциплины «Технологии микро- и наносистемной техники». Технологический процесс - основные понятия.
2. Кремниевые подложки и их назначение. Особенности перехода с 300 мм на 450 мм кремниевые пластины.
3. Источники и виды загрязнений поверхности подложек и пластин.
4. Классификация методов очистки пластин и подложек.
5. Способы жидкостной обработки подложек. Обезжиривание, химическое и электрохимическое травление, промывание в воде.
6. Химическое и электрохимическое травление. Стадии процесса травления. Селективные и полирующие травители.
7. Интенсификация процессов очистки.
8. Методы сухой очистки. Термообработка и газовое травление. Основные достоинства и недостатки.
9. Ионное травление. Плазмохимическое травление.
10. Виды загрязнений и способы их удаления.
11. Основные технологические процессы для создания полупроводниковых микросхем.
12. Последовательность формирования диффузионно-планарной структуры.
13. Определение эпитаксии. Гомоэпитаксия и гетероэпитаксия. Схема возникновения дислокаций несоответствия.
14. Способы эпитаксии. Эпитаксия из газовой фазы. Хлоридный и силановый метод. Технология проведения газофазной эпитаксии. Схема горизонтального реактора для эпитаксии из парогазовой смеси.
15. Жидкофазная эпитаксия. Область применения, достоинства и недостатки.
16. Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). Основные требования к установке МЛЭ.
17. Устройство установки молекулярно-лучевой эпитаксии (основные составляющие и их функции).
18. Блок-схема реактора для МЛЭ. Механизм МЛЭ.
19. Легирование при эпитаксии. Дефекты эпитаксиальных пленок. Возможности, основные достоинства и недостатки МЛЭ.
20. Термическое окисление. Функции SiO_2 . Механизм окисления.
21. Основы технологии проведения диффузии и контроля диффузионных слоев.
22. Распределение примеси при диффузии из ограниченного и бесконечного источника. Расчет глубины залегания p-n перехода.

23. Взаимодействие ионов высоких энергий с поверхностью твердого тела.
Виды взаимодействия. Взаимодействие с ядрами и электронами, пробег ионов, каналирование.
24. Ионная имплантация. Профили распределения примеси при ИИ. Дефекты при ИИ и способы их устранения.
25. Основные виды литографии. Методы оптической литографии.
26. Фоторезист - определение. Методы нанесения фоторезистов.
27. Основные параметры фоторезистов: светочувствительность, разрешающая способность, кислотостойкость, адгезия к подложке.
28. Позитивные и негативные фоторезисты. Проблемы оптической литографии.
29. Основы электронно-лучевой литографии. Общая характеристика .
Проекционная литография.
30. Сканирующая электронно-лучевая литография. Факторы, ограничивающие разрешающую способность электронолитографии.
31. Основы рентгеновской литографии. Ионная литография.
32. Основы вакуумных технологий – понятие вакуума, степени вакуума.
33. Характеристики различных степеней вакуума. Число Кнудсена.
34. Общая характеристика вакуумных насосов.
35. Физические принципы объемной откачки (форвакуумные насосы)
36. Высоковакуумные насосы. Физические принципы, лежащие в основе работы диффузионных насосов.
37. Физические принципы измерения вакуума. Деформационные и теплоэлектрические вакуумметры.
38. Физические принципы измерения вакуума. Ионизационные вакуумметры.
39. Состав вакуумной системы.
40. Функции основных элементов вакуумных систем.
41. Поиск течей в вакуумных системах. Классификация течей.
42. Основные методы поиска течей. Манометрический метод. Масс-спектрометрический метод.
43. Понятие тонкопленочного состояния вещества. Основные определения.
44. Механизмы роста пленок
45. Этапы и четыре стадии формирования пленок
46. Термовакuumное напыление
47. Ионно-плазменные методы получения тонких пленок
48. Физико-химические процессы при формировании тонких пленок катодным распылением
49. Модели и механизмы катодного распыления
50. Трехэлектродная система распыления

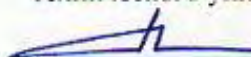
- 51. Механизмы реактивного распыления
- 52. Отличительные особенности магнетронного распыления
- 53. Ионно-лучевые методы получения тонких пленок.
- 54. Физические принципы контроля толщины напыляемых пленок
- 55. Основные методы синтеза порошков для нанокерамики. Технологические трудности при производстве нанокерамики.
- 56. Основные нелитографические методы в технологии микро- и наносистемной техники.
- 57. Технология кремниевой объёмной микрообработки.
- 58. Технология кремниевой поверхностной микрообработки.
- 59. LIGA технологии.
- 60. SIGA технологии.

IV. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

Белорусский национальный технический университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе,
довузовской подготовке,
социальным вопросам и спорту
Белорусского национального
технического университета

 О.К. Гусев

01.06.2016

Регистрационный № УД- ПСФ06-31 /уч.

**ТЕХНОЛОГИИ НАНО- И МИКРОСИСТЕМНОЙ
ТЕХНИКИ**

Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности
1-38 01 04 «Микро- и наносистемная техника»

2016 г.

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта ОСВО 1-38 01 04-2013.

СОСТАВИТЕЛЬ:

Е.Н.Щербакова, доцент кафедры «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета, кандидат физико-математических наук.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Е.Г.Зайцева, доцент кафедры «Конструирование и производство приборов» Белорусского национального технического университета, кандидат технических наук, доцент;

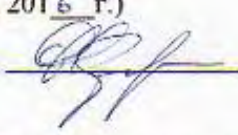
М.И.Маркевич, заведующая лабораторией физики тонких пленок Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», доктор физико-математических наук, профессор.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета
(протокол № 9 от 18.05. 2016 г.)

/ Заведующий кафедрой  Ю.М.Плескачевский

Методической комиссией приборостроительного факультета Белорусского национального технического университета
(протокол № 9 от 25.05 2016 г.)

Председатель методической  В.В. Красовский
комиссии

Научно-методическим советом Белорусского национального технического университета (протокол № 5 секции №1 от 31.05 2016г.)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная программа по учебной дисциплине «Технологии нано- и микросистемной техники» разработана для специальности 1-38 01 04 «Микро- и наносистемная техника».

Целью изучения дисциплины является приобретение студентами знаний об основных технологических методах изготовления элементов микро- и наносистемной техники, свойствах и возможностях микро- и наносистемной техники.

Основными задачами преподавания учебной дисциплины являются: приобретение студентом знаний о базовых технологических процессах изготовления компонентов микро- и наносистемной техники, по основам эпитаксии, различным видам литографических процессов, тонкопленочным и вакуумным технологиям, зондовым нанотехнологиям и нелитографическим методам формирования наноструктур, параметрам и основным свойствам микро- и наносистемной техники.

Учебная дисциплина базируется на знаниях, полученных при изучении таких дисциплин как: «Математика», «Физика», «Физическая химия», «Технология материалов и компонентов электронной техники» и др. Знания и умения, полученные студентами при изучении данной дисциплины, необходимы для освоения последующих специальных дисциплин и дисциплин специализаций, таких как «Физика нано- и микросистем», «Информационные технологии нано- и микросистемной техники», «Техника наноконтроля».

В результате изучения учебной дисциплины «Технологии нано- и микросистемной техники» студент должен:

знать:

- зондовые нанотехнологии, включая метод локального зондового окисления;
- нелитографические методы формирования поверхностных периодических наноструктур;
- технологию самоорганизованных, имплантированных, наноразмерных структур в полупроводниках;
- технологии нанокompозитов, нанокерамики, сверхпроводников и волноводных наноразмерных структур;

уметь:

- характеризовать микро- и наноэлектромеханические системы, микро- и наносистемную технику;
- зондовые нанотехнологии и методы нанокompактирования;

- анализировать параметры и основные свойства, реализующиеся в различных микро- и нанoeлектромеханических системах, структурную организацию наносистем,;
- конструировать наноструктуры и элементы нанoeлектроники на основе использования зондовых технологий;

владеть:

- методами зондовой технологии получения покрытий на наноуровне;
- методами нанокompактирования и техникой получения самоорганизованных, имплантированных, наноразмерных структур;
- методами и технологией изготовления наносистемной техники.

Освоение данной учебной дисциплины обеспечивает формирование следующих компетенций:

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.

АК-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-4. Уметь работать самостоятельно.

АК-5. Быть способным порождать новые идеи (обладать креативностью).

АК-6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.

АК-7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

АК-8. Обладать навыками устной и письменной коммуникации.

АК-9. Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение всей жизни.

СЛК-3. Обладать способностью к межличностным коммуникациям.

СЛК-5. Быть способным к критике и самокритике.

СЛК-6. Уметь работать в команде.

ПК-1. Разрабатывать технологические процессы изготовления изделий и технологическую документацию, следить за соблюдением технологических процессов и соответствия режимов работы действующим стандартам, правилам и нормам.

ПК-2. Работать с технологической и нормативно-технической документацией, с технической и научной литературой.

ПК-3. Осуществлять контроль качества продукции, производить необходимые измерения технических параметров, на основе технических показателей технологических процессов и оборудования выявлять причины брака и уметь устранять их.

ПК-4. Принимать инженерные решения по повышению производительности труда на основе современных технических решений, содействовать на практике внедрению средств автоматизации и механизации производственных процессов.

ПК-5. Производить планирование производства и рабочих мест.

ПК-6. Контролировать соблюдение норм охраны труда и техники безопасности при работах на производстве, норм противопожарной безопасности, обеспечивать обучение персонала, работающего с технологическим оборудованием, правилам безопасности и осуществлять своевременную проверку знаний.

ПК-25. Готовить доклады, материалы к презентациям.

ПК-22. Взаимодействовать со специалистами смежных профилей.

ПК-25. Готовить доклады, материалы к презентациям.

ПК-26. Владеть современными средствами инфокоммуникаций.

Согласно учебным планам на изучение учебной дисциплины отведено:

- для очной формы получения высшего образования всего 250 ч., из них аудиторных - 132 часа;

- для заочной формы получения высшего образования, интегрированного со средним специальным образованием всего 250 ч., из них аудиторных – 36 часов.

Распределение аудиторных часов по курсам, семестрам и видам занятий приведено ниже.

Таблица 1.

Очная форма получения высшего образования					
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторн ые занятия, ч.	Практическ ие занятия, ч.	Форма текущей аттестации
4	7	34	-	16	зачет
4	8	50	16	16	курсовой проект, экзамен

Таблица 2.

Заочная форма получения высшего образования, интегрированного со средним специальным образованием					
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторн ые занятия, ч.	Практическ ие занятия, ч.	Форма текущей аттестации
3	5	2	-	-	-
3	6	6	-	6	зачет
4	7	8	8	6	курсовой проект, экзамен

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Тема 1.1. Введение

Цель и задачи дисциплины. Нанотехнологии в современных электронных системах.

Тема 1.2. Классификация технологических процессов

Классификация основных технологических процессов производства компонентов микро- и наносистемной техники.. Технологический процесс - основные понятия. Периодический, непрерывный и комбинированный технологический процесс. Технологичность. Методы оценки технологичности. Последовательность формирования диффузионно-планарной структуры.

Раздел II. ЗОНДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

Тема 2.1. Наноструктуры и элементы наноэлектроники на базе

метода локального зондового окисления

Основные методы создания наноструктур. Зондовые методы нанолитографии. Метод локального зондового окисления. Физико-химические основы метода локального зондового окисления. Особенности создания электропроводящих зондов. Примеры использования локального зондового окисления для создания наноструктур и элементов наноэлектроники.

Тема 2.2 Элементная база наноэлектроники на основе зондовых нанотехнологии

Основы зондовых нанотехнологии. Зондовое формирование полимерных микропроводников. Методы формирования металлических квазиодномерных

микроконтактов на подложках. Нанотранзисторы на основе углеродных нанотрубок. Метод приготовления проводников на основе пучка углеродных нанотрубок. Модифицирование углеродных нанотрубок на подложках. Исследование нанотрубок методами сканирующей электронной микроскопии и микроанализа. Углеродная наноэлектроника.

Раздел III. КРЕМНИЕВЫЕ ПОДЛОЖКИ И ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ GaAs

Тема 3.1. Кремниевые подложки и их назначение.

Классификация подложек по структурным признакам и назначению. Этапы производства пластин из слитков монокристаллического кремния. Особенности перехода с 300 мм на 450 мм кремниевые пластины. Основные технологические трудности, возникающие при производстве пластин большего диаметра.

Тема 3.2 Полупроводниковые гетероструктуры и приборы на их основе

Основные типы полупроводниковых приборных гетероструктур. Методы описания и проектирования приборных гетероструктур. Гетероструктурные полевые транзисторы. Интегральные микросхемы на гетеропереходных полевых транзисторах. Особенности технологического маршрута изготовления интегральных схем на основе GaAs и полупроводниковых гетероструктур соединений группы A^3B^5 .

Раздел IV. БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ- ТРАВЛЕНИЕ, ЭПИТАКСИЯ, ТЕРМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ, ДИФФУЗИЯ И ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

Тема 4.1 Очистка и травление

Источники и виды загрязнений поверхности подложек. Классификация методов очистки подложек. Способы жидкостной обработки подложек. Обезжиривание, химическое и электрохимическое травление, промывание в воде. Селективные и полирующие травители. Лимитирующие стадии травления. Методы сухой очистки. Термообработка, газовое, ионное и плазмохимическое травление. Основные достоинства и недостатки.

Тема 4.2 Эпитаксия

Гомоэпитаксия и гетероэпитаксия. Схема возникновения дислокаций несоответствия. Эпитаксия из газовой фазы. Хлоридный и силановый метод.

Технология проведения газофазной эпитаксии. Жидкофазная эпитаксия. Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). Основные требования к установке МЛЭ. Устройство установки молекулярно-лучевой эпитаксии. Легирование при эпитаксии. Дефекты эпитаксиальных пленок. Возможности, основные достоинства и недостатки МЛЭ.

Тема 4.3 Термическое окисление.

Термическое окисление. Основные функции SiO_2 . Механизмы окисления. Классификация методов окисления и получаемых окислов.

Тема 4.4 Диффузия и ионная имплантация

Основы технологии проведения диффузии и контроля диффузионных слоев. Распределение примеси при диффузии из ограниченного и бесконечного источника. Расчет глубины залегания p-n перехода.

Взаимодействие ионов высоких энергий с поверхностью твердого тела. Ионная имплантация. Профили распределения примеси при ионной имплантации. Дефекты при ионной имплантации и способы их устранения. Самоорганизованные имплантированные наноразмерные структуры в полупроводниках. Наноструктурированные слои дисилицидов на поверхности кремния, образующиеся при внедрении ионов в кремниевую подложку. Методы формирования силицидов. Свойства самоорганизованных SiGe-наноструктур, полученных методом ионной имплантации.

Раздел V. ЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ И НЕЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНОЛОГИИ МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ.

Тема 5.1 Литографические процессы

Основные виды литографии. Методы оптической литографии. Способы нанесения фоторезистов. Основные параметры фоторезистов: светочувствительность, разрешающая способность, кислотостойкость, адгезия к подложке. Позитивные и негативные фоторезисты. Принципы электронно-лучевой литографии. Проекционная литография. Сканирующая электронно-лучевая литография. Основы рентгеновской литографии.

Тема 5.2 Нелитографические методы создания периодических структур.

Самоорганизующиеся упорядоченные пористые материалы. Получение и применение в нанотехнологии. Плазменные методы в технологии поверхностных периодических наноструктур. Специфика используемого плазменного оборудования. Технологические особенности обеспечения высокого аспектного отношения наноструктур. Наноимпринтинг. Контроль параметров наноструктурированных поверхностей с помощью электронографии и электронной микроскопии.

РАЗДЕЛ VI. ВАКУУМНЫЕ И ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Тема 6.1. Основы вакуумных технологий

Понятие вакуума, степени вакуума. Характеристики различных степеней вакуума. Число Кнудсена, его физический смысл. Общая характеристика вакуумных насосов. Физические принципы объемной откачки. Форвакуумные насосы и принципы их работы. Высоковакуумные насосы. Физические принципы, лежащие в основе работы диффузионных насосов. Состав вакуумной системы. Функции основных элементов вакуумных систем.

Тема 6.1. Основные методы формирования тонких пленок и их контроля

Термовакuumное напыление. Ионно-плазменные методы получения тонких пленок. Физико-химические процессы при формировании тонких пленок катодным распылением. Модели и механизмы катодного распыления. Отличительные особенности магнетронного распыления. Ионно-лучевые методы получения тонких пленок. Физические принципы контроля толщины напыляемых пленок, исследование их структуры и фазового состава с помощью электронографии и электронной микроскопии.

РАЗДЕЛ VII. ТЕХНОЛОГИИ ВОЛНОВОДНЫХ И СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СТРУКТУР, НАНОКОМПОЗИТОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Тема 7.1. Технологии волноводных наноразмерных структур

Технология изготовления и основные свойства оптических волокон с фотонно-кристаллической структурой. Формирование фотонной запрещенной зоны с помощью субмикронных брэгговских решеток.

Тема 7.2. Технология высокотемпературных сверхпроводников в наноэлектронике

Методы создания наноразмерных сверхпроводниковых структур. Формирование топологического рисунка. Формирование наноразмерной планарной активной зоны. Электронные элементы на основе высокотемпературных сверхпроводников.

Тема 7.3. Технология нанокompозитов и нанокерамики

Классификация композиционных материалов. Нанокристаллические материалы (нанокерамики и нанокompозиты). Основные методы синтеза порошков для нанокерамики. Формование и спекание нанокерамики. Технологические трудности при производстве нанокерамики. Структурно-чувствительные свойства нанокompозитов.

Тема 7.4 Технологии формирования микро- и наноэлектромеханических систем

Основные технологические процессы изготовления элементов микромеханики. Технология кремниевой объёмной и поверхностной микрообработки. LIGA и SIGA технологии. Создание структур кремний на изоляторе для формирования микро- и наносистем. Перспективы развития технологии кремний на изоляторе.

Тенденции развития технологий микро- и наносистемной техники.

ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

Учебным планом специальности предусмотрен курсовой проект. Целью курсового проекта является практическая проработка основных разделов лекционного курса и получение практических навыков разработки технологических процессов изготовления компонентов нано- и микросистемной техники.

Курсовой проект включает в себя следующие разделы:

- анализ литературы по выбранной технологии;
- разработка технологического процесса;

– выбор и обоснование оборудования для проведения технологического процесса;

- расчетная часть в соответствии с тематикой курсового проекта;

- графическая часть.

Примерный объем курсового проекта должен составлять 25-30 страниц.

В соответствии с учебным планом специальности на выполнение курсового проекта отводится 60 часов.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

очная форма получения высшего образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические	Семинарские занятия	Лабораторные	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	7 семестр							
1.	Общие сведения о технологических процессах производства изделий микро- и наносистемной техники	4						
1. 1	Введение	2						
1. 2	Классификация технологических процессов	2						
2.	Зондовые технологии в микро- и наносистемной технике	8	4					
2. 1	Наноструктуры и элементы наноэлектроники на базе метода локального зондового окисления	4	2					

2. 2	Элементная база нанoeлектроники на основе зондовых нанотехнологий	4	2					
3	Кремниевые подложки и гетероструктуры на основе GaAs	6	4					
3. 1	Кремниевые подложки и их назначение	2	2					
3. 2	Полупроводниковые гетероструктуры и приборы на их основе	4	2					Контрольная работа
4	Базовые технологические процессы – травление, эпитаксия, термическое окисление, диффузия и ионная имплантация	16	8					
4. 1	Очистка и травление	4	2					
4. 2	Эпитаксия	4	2					
4. 3	Термическое окисление	2	2					
4. 4	Диффузия и ионная имплантация	6	2					Контрольная работа
	Итого за семестр	34	16					зачет
	8 семестр							

5	Литографические и нелитографические методы в технологии микро- и наносистемной техники	16	4		4			
5.1	Литографические процессы	8	2					
5.2	Нелитографические методы создания периодических структур	8	2		4			Защита лабораторной работы
6	Вакуумные и тонкопленочные технологии	16	4		8			
6.1	Основы вакуумных технологий	8	2		4			Защита лабораторной работы
6.2	Основные методы формирования тонких пленок и их контроля	8	2		4			Защита лабораторной работы
7	Технологии волноводных и сверхпроводящих структур, нанокompозитов, микро- и наноэлектромеханических систем	18	8		4			
7.1	Технологии волноводных наноразмерных структур	4						
7.2	Технология высокотемпературных сверхпроводников в наноэлектронике	4						
7.	Технология нанокompозитов и нанокерамики	6	4					Контрольная

3								я работа
7. 4	Технологии формирования микро- и наноэлектромеханических систем	4	4		4			Защита лабораторно й работы
	Курсовой проект							Защита курсового проекта
	Итого за семестр	50	16		16			экзамен
	Всего аудиторных часов	132						

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

заочная форма получения высшего образования, интегрированного со средним специальным образованием¹

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов			Форма контроля знаний
		Лекции	практические занятия	Лабораторные занятия	
5 семестр					
	Установочная лекция 1. Цели, задачи и объем курсового проекта 2. Выдача задания	2			
	Итого за семестр	2			
6 семестр					
1.	Установочная лекция Общие сведения о технологических процессах производства из-	2			

	делий микро- и наносистемной техники				
4	Базовые технологические процессы – травление, эпитаксия, термическое окисление, диффузия и ионная имплантация	4	6		
4.1	Очистка и травление	2	2		
4.2	Эпитаксия	2			
4.3	Термическое окисление		2		
4.4	Диффузия и ионная имплантация		2		
	Итого за семестр	6	6		Зачет
7 семестр					
5	Литографические и нелитографические методы в технологии микро- и наносистемной техники	4		2	
5.1	Литографические процессы	2		2	
5.2	Нелитографические методы создания периодических структур	2			
6	Вакуумные и тонкопленочные технологии	4	4	4	
6.1	Основы вакуумных технологий		4	2	Защита лабораторной работы
6.2	Основные методы формирования тонких пленок и их контроля		4	2	Защита лабораторно

					й работы
	Курсовой проект				Защита курсового проекта
	Итого за семестр	8	8	6	Экзамен
	Всего аудиторных часов	36			

¹ Темы учебного материала, не указанные в Учебно-методической карте, отводятся на самостоятельное изучение студента.

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Список литературы

Основная литература

14. Ремпель, А. А., Валеева, А.А. Материалы и методы нанотехнологий : учеб. пособие / А.А. Ремпель, А.А. Валеева.— Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015.— 136 с.
15. Лапшинов, Б.А. Технология литографических процессов. Учеб. пособ. М.: МИЭМ, 2011.- 95 с.
16. Агеев, О.А., Федотов, А.А., Смирнов, В.А. Методы формирования структур элементов нанoeлектроники и наносистемной техники: Учебное пособие/ О.А.Агеев, А.А. Федотов, В.А. Смирнов.- Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 72 с.
17. Раскин, А. А. Прокофьева, В. К. Технология материалов микро-, опто- и нанoeлектроники : учебное пособие, ч.1 /А. А. Раскин, В. К.Прокофьева – 2-е изд. - М: Бином, 2010. – 164 с.
18. Орликов, Л.Н. Технология материалов и изделий электронной техники: Учебное пособие /Л.Н. Орликов.- Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. - 382 с.
19. Андриевский, Р.А., Рагуля, А.В. Наноструктурные материалы/ Р.А.Андриевский., А.В Рагуля - М.: Изд.центр «Академия», 2005.- 192 с.
20. Ануфриенко, В.В. Процессы и оборудование фотолитографической обработки/ В.В. Ануфриенко. - М.: МИЭТ, 1998 – 68 с.
21. Березин, А.С. Технология и конструирование интегральных микросхем / А.С.Березин, О.Р. Могалкина – Москва: Радио и связь, 1992. – 432 с.
22. Достанко, А. П. Технология производства ЭВМ : учебник / А. П. Достанко, М. И. Пикуль, А. А. Хмыль. – Минск: Высшая школа, 1994. – 346 с.
23. Розанов, Л.Н. Вакуумная техника: Учеб. для вузов по спец. «Вакуумная техника» /Л.Н.Розанов. – Москва: Высшая школа, 1990. – 320 с.

Дополнительная литература

1. Материалы современной электроники / В.Ф.Марков [и др.]; под общ. ред. В.Ф.Маркова - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 272 с
2. Суздалев, И.П. Нанотехнология: физикохимия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов/ И.П. Суздалев - М.: КомКнига, 2006. -592 с.

3. Процессы микро- и нанотехнологии / Т.И. Данилина [и др.]; - Томск: ТУСУР, 2005. - 315 с.
4. Фролов, Г.И., Жигалов, В.С. Физические свойства и применение магнитопленочных нанокompозитов/ Г.И.Фролов, В.С. Жигалов - Новосибирск: Изд. СО РАН, 2006.- 188 с.

Средства диагностики результатов учебной деятельности

Оценка уровня знаний студента производится по десятибалльной шкале в соответствии с критериями, утвержденными Министерством образования Республики Беларусь.

Для оценки достижений студента рекомендуется использовать следующий диагностический инструментарий:

- устный и письменный опрос во время практических занятий;
- проведение текущих контрольных работ по отдельным темам;
- защита выполненных на лабораторных занятиях индивидуальных заданий;
- защита выполненных в рамках самостоятельной работы индивидуальных заданий;
- собеседование при проведении индивидуальных и групповых консультаций;
- выступление студента на конференции по подготовленному реферату;
- защита курсового проекта;
- сдача зачета по дисциплине;
- сдача экзамена.

Перечень тем практических занятий

1. Примеры использования локального зондового окисления для создания наноструктур и элементов наноэлектроники.
2. Исследование нанотрубок методами сканирующей электронной микроскопии и микроанализа.
3. Этапы производства пластин из слитков монокристаллического кремния.
4. Особенности технологического маршрута изготовления интегральных схем на основе GaAs.
5. Селективные и полирующие травители. Лимитирующие стадии травления.

6. Устройство установки молекулярно-лучевой эпитаксии.
7. Механизмы окисления. Классификация методов окисления и получаемых окислов.
8. Расчет глубины залегания р-п перехода. Распределение примеси при диффузии из ограниченного и бесконечного источника.
9. Способы нанесения фоторезистов.
10. Плазменные методы в технологии наноструктур.
11. Функции основных элементов вакуумных систем.
12. Физические принципы контроля толщины напыляемых пленок.
13. Методы синтеза порошков для нанокерамики.
14. Технология кремниевой объемной и поверхностной микрообработки.

Перечень тем лабораторных работ

1. Исследования структуры и фазового микро- и нанообъектов методами просвечивающей электронной микроскопии
2. Устройство, принцип действия, основные методы поиска и устранения неисправностей при работе на вакуумном напылительном оборудовании
3. Исследования фазового состава тонкопленочных систем на просвет и на отражение методами электронографии
4. Исследование наноразмерных материалов методами сканирующей электронной микроскопии

Примерный перечень тем курсовых проектов

1. Особенности технологических процессов с применением рентгенолитографии
2. Технология формирования пористого кремния
3. Технология формирования фотошаблонов
4. Формирование графена методом химического осаждения
5. Технологические процессы с использованием ионолитографии
6. Технологии формирования полевых транзисторов
7. Основные методы формирования фуллеренов
8. Основные технологии формирования углеродных нанотрубок
9. Технологии создания солнечных элементов
10. Технологические процессы при формировании МОП-транзисторов

11. Технологические процессы поверхностной микрообработки для производства МЭМС
12. Создание структур кремний на изоляторе для формирования микро- и наносистем.
13. Технология очистки пластин кремния для формирования элементов микросистемной техники.
14. Технология контроля качества пластин полупроводниковых материалов.
15. Технология формирования силицидов тугоплавких металлов для микро- и нанoeлектроники.
16. Технологические процессы герметизации микроэлектронных устройств.

Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы студентов

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- решение индивидуальных задач в аудитории во время проведения практических занятий под контролем преподавателя в соответствии с расписанием;
- подготовка курсового проекта по индивидуальным заданиям.

Методы (технологии) обучения

Основными методами (технологиями) обучения, отвечающими целям изучения дисциплины, являются:

- элементы проблемного обучения (проблемное изложение, вариативное изложение, частично-поисковый метод), реализуемые на лекционных занятиях;
- элементы учебно-исследовательской деятельности, творческого подхода, реализуемые на или лабораторных работах и при самостоятельной работе;
- коммуникативные технологии (дискуссия, учебные дебаты, и другие формы и методы), реализуемые на практических занятиях и конференциях.