

**ГОУ ВПО РОССИЙСКО-АРМЯНСКИЙ (СЛАВЯНСКИЙ)
УНИВЕРСИТЕТ**

Составлен в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки выпускников по направлению 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника и Положением «Об УМКД РАУ».

УТВЕРЖДАЮ:

**Директор института
А.А. Саркисян**



21.07.2023

Инженерно-физический институт

Кафедра Технология материалов и структур электронной техники

Автор: *Доцент, к.т.н., Геворкян Владимир Арамович*

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Дисциплина: Б1.В.ДВ.04.02 Технологии нанoeлектроники

Направление: 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»

Магистерская программа: Квантовая и оптическая электроника

ЕРЕВАН 2023

Структура и содержание УМКД

1. Аннотация

1.1. Выписка из ФГОС ВПО РФ по минимальным требованиям к дисциплине

Знать: физические и физико-химические основы технологии производства изделий электроники и нанoeлектроники, физико-технологические и экономические ограничения интеграции и миниатюризации электронной компонентной базы; тенденции и перспективы развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники,

Уметь: обеспечивать технологическую и конструктивную реализацию материалов и элементов электронной техники в приборах и устройствах электроники и нанoeлектроники; предложить новые области научных исследований и разработок, новые методологические подходы к решению задач в профессиональной сфере деятельности.

Владеть: новыми технологиями, обеспечивающими повышение эффективности проектов, технологических процессов, эксплуатации и обслуживания новой техники в области электроники и нанoeлектроники; сведениями о технологии изготовления материалов и элементов электронной техники, об основных тенденциях развития электронной компонентной базы.

1.2. Взаимосвязь дисциплины с другими дисциплинами учебного плана специальности (направления)

Проектирования электронной компонентной базы, нанoeлектроника, Полупроводниковые оптоэлектронные приборы, Излучательная рекомбинация в полупроводниках, Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых гетероструктурах.

1.3. Требования к исходным уровням знаний, умений и навыков студентов для прохождения дисциплины (что должен знать, уметь и владеть студент для прохождения данной дисциплины)

Студент должен:

знать основы по предметам: математического анализа, векторного анализа, дифференциальных уравнений, по общим курсам физики: электричество и магнетизм, оптика, атомная физика, основы твердотельной электроники;

уметь применять свои знания для анализа физических процессов в технологии производства электронной компонентной базы;

владеть навыками экспериментальных и прикладных исследований.

1.4. Предварительное условие для прохождения (дисциплина(ы), изучение которых является необходимой базой для освоения данной дисциплины)

Общий курс физики по электричеству и магнетизму, оптике и атомной физике, основы твердотельной электроники, материалы и элементы электронной техники.

2. Содержание

2.1. Цели и задачи дисциплины

Задачей предмета является изучение технологии производства основных базовых элементов для создания современной микроэлектронной аппаратуры и наноэлектронных структур.

Цель преподавания дисциплины: изучение основных физических и технологических методов изготовления интегральных микросхем и наноразмерных структур и формирование у студентов теоретических и практических навыков, необходимых в технологии производства полупроводниковых приборов.

Учебная задача: ознакомить студентов с основными технологическими маршрутами изготовления структур микросхем, современными методами выращивания пленочных и эпитаксиальных структур, особенностями и возможностями каждого из этих методов для их применения при изготовлении конкретных приборных структур. На основе введенных методологических элементов способствовать формированию системных знаний и развитию творческих способностей студентов.

2.2. Требования к уровню освоения содержания дисциплины (какие компетенции (знания, умения и навыки) должны быть сформированы у студента ПОСЛЕ прохождения данной дисциплины)

После изучения дисциплины студент должен:

знать физические основы технологических методов применяемых для изготовления современных микросхем и их технологические маршруты. Современные технологии применяемые для создания наноразмерных приборов полупроводниковой электроники;
уметь применять полученные знания на практике и в экспериментальных исследованиях по созданию базовых элементов различных полупроводниковых приборов и электронной компонентной базы;

иметь представление о различных современных технологических методах, их особенностях и возможностях для создания различных дискретных полупроводниковых приборов и микросхем;

владеть навыками необходимыми для выполнения различных базовых технологических операции, применяемых в полупроводниковой микро- и наноэлектронике.

2.3. Трудоемкость дисциплины и виды учебной работы (в академических часах и кредитах)

2.3.1. Объем дисциплины и виды учебной работы

Виды учебной работы	Всего, в акад. часах
1. Общая трудоемкость изучения дисциплины по семестрам, в т. ч.:	144
1.1. Аудиторные занятия, в т. ч.:	34
1.1.1. Лекции	18
1.1.2. Практические занятия	16
1.2. Самостоятельная работа, в т. ч.:	110
1.2.1. Подготовка к лабораторным работам	74
1.2.2. Подготовка к экзамену	36
Итоговый контроль	экзамен

2.3.2. Распределение объема дисциплины по темам и видам учебной работы

Разделы и темы дисциплины	Всего (ак. часов)	Лекции (ак. часов)	Практ. (ак. часов)
1	2=3+4+5	3	4
Модуль 1.	14	8	6
Раздел 1. Общая характеристика технологии микросхем.	3	3	-
<i>Тема 1.1. Классификация и основные этапы технологии изготовления микросхем.</i>	1	1	-
<i>Тема 1.2. Основные принципы интегральной технологии.</i>	1	1	-
<i>Тема 1.3. Основные технологические методы изготовления интегральных структур.</i>	1	1	-
Раздел 2. Изготовление и очистка пластин и подложек.	2	1	1
<i>Тема 2.1. Требования к подложкам (геометрические параметры).</i>	1	-	1
<i>Тема 2.2. Загрязнения и методы очистки поверхности пластин и подложек.</i>	1	1	-
Раздел 3. Сухая очистка и травление подложек.	5	3	2
<i>Тема 3.1. Термообработка. Ионное травление.</i>	1	1	-
<i>Тема 3.2. Травление подложек в диодных камерах.</i>	1	-	1
<i>Тема 3.3. Ионно-плазменное травление в триодных камерах.</i>	1	1	-
<i>Тема 3.4. Ионно-лучевое травление.</i>	1	-	1
<i>Тема 3.5. Газовое травление.</i>	1	1	
Раздел 4. Методы формирования топологии микросхем.	4	1	3
<i>Тема 4.1. Методы формирования топологии микросхем.</i>	1	-	1
<i>Тема 4.2. Оптическая литография.</i>	1	-	1
<i>Тема 4.3. Формирование фотомаски – создание топологического рисунка (экспонирование, проявление, 2-ая сушка).</i>	2	1	1
Модуль 2	20	10	10
Раздел 5. Методы получения тонких пленок.	15	8	7
<i>Тема 5.1. Термическое напыление</i>	2	1	1
<i>Тема 5.2. Методы и техника термовакuumного напыления.</i>	2	1	1
<i>Тема 5.3. Испарение методом ионной бомбардировки.</i>	1	-	1

<i>Тема 5.4. Ионно-плазменное распыление.</i>	1	1	-
<i>Тема 5.5. Высокочастотное распыление.</i>	2	1	1
<i>Тема 5.6. Магнетронное распыление.</i>	2	1	1
<i>Тема 5.7. Термическое окисление.</i>	2	1	1
<i>Тема 5.8. Химическое осаждение из парогазовой фазы</i>	1	1	-
<i>Тема 5.9. Контроль параметров пленок в процессе осаждения</i>	2	1	1
Раздел 6. Методы получения полупроводниковых слоев и р-п переходов.	5	2	3
<i>Тема 6.1. Диффузионное легирование</i>	1	-	1
<i>Тема 6.2. Эпитаксия из парогазовой фазы</i>	1	1	-
<i>Тема 6.3. Основы метода жидкостной эпитаксии</i>	1	-	1
<i>Тема 6.4. Основы метода МОС гидридной эпитаксии</i>	1	1	-
<i>Тема 6.5. Молекулярно-лучевая эпитаксия.</i>	1	-	1
ИТОГО	36	18	18

2.3.3. Содержание разделов и тем дисциплины

МОДУЛЬ 1.

Введение

Раздел 1. Общая характеристика технологии микросхем.

Тема 1.1. Классификация и основные этапы технологии изготовления микросхем.

Основные конструктивные элементы микросхем. Классификация микросхем. Основные этапы технологии изготовления микросхем. ([1] гл. 1)

Тема 1.2. Основные принципы интегральной технологии.

Взаимосвязь проектирования конструкции и технологии. Основные принципы интегральной технологии. Принцип совместимости элементов. Свободная маска, контактная маска. ([1] гл. 1)

Тема 1.3. Основные технологические методы изготовления интегральных структур.

Планарная технология. Мезотехнология (преимущества и недостатки). Эпитаксиальные технологии. ([1] гл. 1)

Раздел 2. Изготовление и очистка пластин и подложек.

Тема 2.1. Требования к подложкам (геометрические параметры).

Геометрические параметры пластин. Подложки гибридных и пленочных микросхем. ([1] гл. 2)

Тема 2.2. Загрязнения и методы очистки поверхности пластин и подложек.

Физическая и химическая адсорбция. Источники загрязнений. Жидкостная очистка поверхности пластин. Методы очистки: обезжиривание, обезжиривание методом погружения, в парах растворителя, ультразвуковая очистка). Сухая очистка. ([1] гл. 2)

Раздел 3. Сухая очистка и травление подложек.

Тема 3.1. Термообработка. Ионное травление. ([1] гл. 2)

Тема 3.2. Травление подложек в диодных камерах. ([1] гл. 2)

Тема 3.3. Ионно-плазменное травление в триодных камерах. ([1] гл. 2)

Тема 3.4. Ионно-лучевое травление. ([1] гл. 2)

Тема 3.5. Газовое травление. ([1] гл. 2)

Раздел 4. Методы формирования топологии микросхем.

Тема 4.1. Методы формирования топологии микросхем.

Применение литографии. Этапы и основные операции литографического процесса. Прямая и обратная литография. ([1] гл. 3)

Тема 4.2. Оптическая литография(фотолитография).

Фоторезисты. Фотошаблоны. Методы нанесения слоя фоторезиста. Термообработка (первая сушка). ([1] гл. 3)

Тема 4.3. Формирование фотомаски – создание топологического рисунка (экспонирование, проявление, 2-ая сушка).

Экспонирование контактным способом. Экспонирование с микроззором. Проекционное экспонирование. Проявление. Термообработка (вторая сушка). ([1] гл. 3)

Тема 4.4. Электронная литография.

Достоинства и основы метода электронной литографии. Сканирующая электронолитография. Проекционная электронолитография. ([1] гл. 3)

МОДУЛЬ 2.

Раздел 5. Методы получения тонких пленок.

Тема 5.1. Термическое напыление.

Основы метода (4-ре этапа). Образование пара, распространение пара (средняя длина свободного пробега частиц), конденсация пара на поверхности подложки, образование зародышей. ([1] гл. 4)

Тема 5.2. Методы и техника термо-вакуумного напыления (ТВН).

Основные параметры процесса ТВН. Достоинства и недостатки метода. ([1] гл. 4)

Тема 5.3. Испарение методом ионной бомбардировки.

Основы метода, образование потока частиц, конденсация, образование зародышей. Физическое катодное распыление. Реактивное катодное распыление. ([1] гл. 4)

Тема 5.4. Ионно-плазменное распыление. ([1] гл. 4)

Тема 5.5. Высокочастотное распыление. ([1] гл. 4)

Тема 5.6. Магнетронное распыление. ([1] гл. 4)

Тема 5.7. Термическое оксидирование.

Основы метода. Техника процесса. Термическое оксидирование при повышенном давлении термическое оксидирование с добавлением HCl. ([1] гл. 4)

Тема 5.8. Химическое осаждение из парогазовой фазы.

Основы метода. Осаждение пленок SiO₂. Пиролитическое разложение тетраэтоксисилана и моносилана. Осаждение пленок нитрида кремния. Осаждение пленок тугоплавких металлов. ([1] гл. 4, [3] гл. 1)

Тема 5.9. Контроль параметров пленок в процессе осаждения.

Резистивный метод. Частотный метод. Фотометрический метод. ([1] гл. 4)

Раздел 6. Методы получения полупроводниковых слоев и переходов.

Тема 6.1. Диффузионное легирование.

Основы метода. Первое и второе уравнения Фика. Диффузия из постоянного бесконечного источника. Диффузия из ограниченного источника. Особенности диффузии при изготовлении микросхем (двухстадийная диффузия). Техника выполнения диффузионного процесса. ([1] гл. 5, [2] гл.2)

Тема 6.2. Эпитаксия из парогазовой фазы.

Эпитаксия кремниевых слоев. Хлоридный метод. Силановый метод. Легирование из газовых и жидких источников. ([2] гл.2)

Тема 6.3. Основы метода жидкостной эпитаксии.

Классификация методов жидкостной эпитаксии. Жидкостная эпитаксия полупроводниковых соединений A_3B_5 . Расчет толщины эпитаксиального слоя. ([4] гл. 1, [2] гл.2)

Тема 6.4. Основы метода МОС гидридной эпитаксии.

Тема 6.5. Молекулярно-лучевая эпитаксия. ([1] гл. 5, [2] гл.2, [3] гл. 1)

2.3.4. Краткое содержание семинарских/практических занятий

1. Технологические методы изготовления интегральных структур.
2. Методы очистки поверхности пластин и подложек.
3. Методы формирования топологии микросхем.
4. Методы получения тонких пленок.
5. Методы получения полупроводниковых слоев и переходов.

2.4. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Учебные методические пособия

Теоретический блок

2.6. *Материалы по теоретической части курса*

2.6.1. *Учебник(и)*

а) Базовый учебник

1. И.А. Малышева. Технология производства интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1991.

б) Основная литература

2. Todd Steiner. Semiconductor Nanostructures for Optoelectronic Applications.- ARTECH HOUSE, INC., 2004.
3. В.Е. Борисенко, А.И. Воробьева. Нанозлектроника, часть 2.- Минск 2003.
4. В.М. Андреев и др. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. – М.: Советское радио, 1975.
5. Л. Ченг, К. Плог. Молекулярно- лучевая эпитаксия и гетероструктуры.- Издательства «Мир», 1989.

в) Дополнительная литература

6. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1983.
7. Курносков А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1985.
8. Нашельский А.Я. Технология полупроводниковых материалов. – М.: Металлургия, 1987.

2.6.2. *Кратки конспект лекций (краткие аннотации по каждой теме)*

Введение

Раздел 1. Общая характеристика технологии микросхем.

Тема 1.1. Классификация и основные этапы технологии изготовления микросхем.

Основные конструктивные элементы микросхем. Классификация микросхем. По конструктивно-технологическому исполнению структур ИМ подразделяются на три группы: полупроводниковые, гибридные и прочие(пленочные, вакуумные керамические и др.) Основные этапы технологии изготовления микросхем состоящие из изготовления и очистки подложек, изготовления структуры микросхем, сборка и тестирование. ([1] гл. 1)

Тема 1.2. Основные принципы интегральной технологии.

Принцип совместимости элементов на основе взаимосвязи проектирования конструкции и технологии состоящий в изготовлении различных элементов в одном технологическом процессе. Основные принципы интегральной технологии. Практическая реализация этого принципа осуществляется с помощью экранирования отдельных участков от воздействия или с помощью локальной обработки поверхности. В первом случае используется масочная технология, а во втором-безмасочная. Понятие свободной и контактной маски. ([1] гл. 1)

Тема 1.3. Основные технологические методы изготовления интегральных структур.

Понятие планарной технологии, мезатеchnологии их преимущества и недостатки. Понятие эпитаксиальной технологии. ([1] гл. 1)

Раздел 2. Изготовление и очистка пластин и подложек.

Тема 2.1. Требования к подложкам.

Рассматриваются основные типы геометрических параметров пластин. Рассматриваются типы подложек, используемые для гибридных и пленочных микросхем. ([1] гл. 2)

Тема 2.2. Загрязнения и методы очистки поверхности пластин и подложек.

Дается объяснение механизма физической и химической адсорбции, приводящие к загрязнению поверхности подложек. Рассматриваются источники загрязнений и методы их очистки. Жидкостная очистка поверхности пластин. Методы очистки: обезжиривание, обезжиривание методом погружения, в парах растворителя, ультразвуковая очистка). Сухая очистка. ([1] гл. 2)

Раздел 3. Сухая очистка и травление подложек.

Тема 3.1. Термообработка. Применяется для удаления адсорбированных поверхностью примесей, разложения и испарения летучих соединений. Описываются методики термообработки кремниевых подложек. Ионное травление. Ионное травление выполняют в вакуумных установках путем бомбардировки подложек ускоренными положительными ионами инертных газов. Описывается механизм ионного травления и технология их осуществления. ([1] гл. 2)

Тема 3.2. Травление подложек в диодных камерах. Травление в диодных камерах проводят при постоянном или переменном высокочастотном напряжении. Описывается механизм возникновения тлеющего разряда и физические процессы приводящие к травлению подложек. Рассматривается механизм высокочастотного травления диэлектрических подложек. ([1] гл. 2)

Тема 3.3. Ионно-плазменное травление в триодных камерах. Ионно-плазменное травление в триодных камерах выполняется в плазме несамостоятельного дугового разряда, который зажигается между анодом и катодом при более высоком вакууме, чем в диодных камерах. Рассматриваются конструктивные особенности установок для ионно-плазменного травления. ([1] гл. 2)

Тема 3.4. Ионно-лучевое травление. Ионно-лучевое травление выполняют в вакуумных установках, в которых луч ионов формируется в специальном газоразрядном источнике и с помощью специальной системы вытягивается в камеру для травления подложки. Рассматриваются особенности данного метода травления. ([1] гл. 2)

Тема 3.5. Газовое травление. Сущность метода газового травления заключается в химическом взаимодействии подложки с газообразным реагентом и образованием при этом легко удаляемых летучих соединений. Рассматриваются химические методы травления подложек кремния и сапфира. ([1] гл. 2)

Раздел 4. Методы формирования топологии микросхем.

Тема 4.1. Методы формирования топологии микросхем.

Рассматриваются этапы и основные операции литографического процесса. Рассматриваются способы передачи топологического рисунка методами прямой и обратной литографии. В зависимости от типа излучения различают оптическую, рентгеновскую, электронную и ионную литографию. ([1] гл. 3)

Тема 4.2. Оптическая литография (фотолитография).

Рассматривается технологический маршрут оптической литографии, метод создания фотошаблона и фоторезиста. Описываются разные методы нанесения слоя фоторезиста и последующей ее термообработки (первая сушка). ([1] гл. 3)

Тема 4.3. Формирование фотомаски – создание топологического рисунка (экспонирование, проявление, 2-ая сушка).

Экспонирование контактным способом осуществляется при полном контакте фотошаблона с подложкой. Существенным ограничением контактной литографии является

неизбежность механических повреждений. Контактная литография обеспечивает высокое разрешение. Экспонирование с микрозазором отличается от контактной наличием тонкого зазора, что ухудшает разрешение. Проекционное экспонирование состоит в том, что изображение фотошаблона получают на поверхности фотослоя с помощью оптической системы. Основное ограничение: сложность создания высокого разрешения. Проявление-процесс удаления лишнего в фотослое участков в соответствии с локальным облучением при экспонировании. Термообработка (вторая сушка) проводится для удаления паров воды, повышения химической стойкости и адгезии фотомаски с подложкой. ([1] гл. 3)

Тема 4.4. Электронная литография.

Описываются достоинства и основы метода электронной литографии. Электронное экспонирование основано на нетермическом взаимодействии ускоренных электронов с электрорезистом. Обладая высокой энергией электроны разрывают почти все химические связи в фоторезисте. Рассматриваются принцип работы установки сканирующей электронолитографии. Рассматривается метод проекционной электронолитографии с сохранением масштаба и с уменьшением масштаба. ([1] гл. 3)

МОДУЛЬ 2.

Раздел 5. Методы получения тонких пленок.

Тема 5.1. Термическое напыление.

Основы метода. Метод основан на создании направленного потока пара вещества и последующей конденсации его на поверхности подложки, имеющей температуру ниже температуры источника пара. Рассмотрены основные этапы термического испарения: образование пара, распространение пара (средняя длина свободного пробега частиц), конденсация пара на поверхности подложки, образование зародышей. ([1] гл. 4)

Тема 5.2. Методы и техника термо-вакуумного напыления (ТВН).

Рассмотрены типы устройств для осуществления термовакуумного напыления, в том числе методы нагрева испаряемого вещества, типы испарителей, метод дискретного испарения и др. Проанализированы достоинства и недостатки метода. ([1] гл. 4)

Тема 5.3. Испарение методом ионной бомбардировки.

Рассмотрены основы метода, образование потока частиц, конденсация, образование зародышей. Рассмотрен принцип и установки для физического катодного распыления. Описан метод реактивного катодного распыления. ([1] гл. 4)

Тема 5.4. Ионно-плазменное распыление. ([1] гл. 4)

Рассмотрен принцип ионно-плазменного распыления в триодных установках и конструктивные особенности этих установок.

Тема 5.5. Высокочастотное распыление. ([1] гл. 4)

Рассмотрен принцип высокочастотного диодного распыления диэлектрических материалов и конструктивные особенности установок для реализации этого метода.

Тема 5.6. Магнетронное распыление. ([1] гл. 4)

Рассмотрен принцип магнетронного распыления и его отличительные особенности по сравнению с другими ионно-плазменными методами распыления.

Тема 5.7. Термическое оксидирование.

Рассмотрены основы метода и модель термического оксидирования кремния. Рассмотрена техника процесса термического оксидирования при нормальном и повышенном давлении, а также процесс термического оксидирования с добавлением HCl. ([1] гл. 4)

Тема 5.8. Химическое осаждение из парогазовой фазы.

Рассмотрены основы метода и стадии процесса роста пленок. Рассмотрен процесс осаждения пленок SiO₂ методом пиролитического разложения тетраэтоксисилана и

моносилана. Рассмотрен процесс осаждения пленок нитрида кремния и пленок тугоплавких металлов. ([1] гл. 4, [3] гл. 1)

Тема 5.9. Контроль параметров пленок в процессе осаждения.

Рассмотрены методы контроля параметров пленок его толщины и скорости осаждения в процессе напыления с использованием резистивного метода, частотного метода и фотометрического метода. ([1] гл. 4)

Раздел 6. Методы получения полупроводниковых слоев и переходов.

Тема 6.1. Диффузионное легирование.

Основы метода диффузии. Рассматриваются вакансионный, обменный и междуузельный механизмы диффузии. Рассматриваются первое и второе уравнения Фика, описывающие процессы диффузии. Рассматриваются распределение примесей в полупроводнике при диффузии из постоянного бесконечного источника и диффузии из ограниченного источника. Рассматриваются особенности диффузии при изготовлении микросхем (двухстадийная диффузия и техника выполнения диффузионного процесса для кремния. ([1] гл. 5, [2] гл.2)

Тема 6.2. Эпитаксия из парогазовой фазы.

Рассматриваются различные методы эпитаксии кремниевых слоев: хлоридный метод и силановый метод. Рассматривается зависимость скорости роста эпитаксиального слоя от температуры и концентрации газовой фазы. Рассматриваются также способы легирования кремниевых слоев из газовых и жидких источников. Описывается технологическое оборудование для выполнения процесса эпитаксии. ([2] гл.2)

Тема 6.3. Основы метода жидкостной эпитаксии.

Описываются принцип эпитаксии полупроводниковых слоев из жидкой фазы на примере полупроводниковых соединений A_3B_5 . Рассматриваются различные методы жидкостной эпитаксии: метод эпитаксии с понижением температуры, метод эпитаксии из пересыщенного раствора-расплава, метод изотермического смешивания и др. Рассматриваются уравнения массопереноса, описывающие процесс роста при жидкостной эпитаксии. Рассматривается вывод уравнения для определения зависимости толщины пленки от параметров технологического процесса. Рассматриваются некоторые конструкции ростовых ячеек для жидкостной эпитаксии и техника проведения процесса жидкостной эпитаксии. ([4] гл. 1, [2] гл.2)

Тема 6.4. Основы метода МОС гидридной эпитаксии.

Рассматриваются основы метода газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Рассматриваются современные методы МОС гидридной эпитаксии с пониженным давлением. Рассматриваются газовые источники для выращивания легирования полупроводниковых соединений соединений A_3B_5 и их твердых растворов.

Тема 6.5. Молекулярно-лучевая эпитаксия.

Рассматриваются основы метода молекулярно-лучевой эпитаксии полупроводниковых соединений A_3B_5 и стадии процесса формирования и роста пленок. Рассматриваются особенности конструкции установок молекулярно-лучевой эпитаксии и техника проведения процесса молекулярно-лучевой эпитаксии. ([1] гл. 5, [2] гл.2, [3] гл. 1)

3. Практический блок

3.1. План практических занятий

- Технологические методы изготовления интегральных структур.
- Методы очистки поверхности пластин и подложек.
- Методы формирования топологии микросхем.

- Методы получения тонких пленок.
- Методы получения полупроводниковых слоев и переходов.

4. Материалы по оценке и контролю знаний

4.1. Перечень контрольных вопросов

1. Основные принципы интегральной технологии.
 - Принцип совместимости элементов.
 - Свободная маска, контактная маска.
2. Основные технологические методы изготовления интегральных структур.
 - Планарная технология.
 - Меза - технология (преимущества и недостатки).
 - Эпитаксиальные технологии.
3. Изготовление и очистка пластин и подложек.
 - Требования к подложкам (геометрические параметры).
4. Загрязнения и методы очистки поверхности пластин и подложек.
 - Физическая и химическая адсорбция.
 - Источники загрязнений.
 - Жидкостная очистка поверхности пластин.
 - Методы очистки: обезжиривание, обезжиривание методом погружения, в парах растворителя, ультразвуковая очистка).
5. Сухая очистка и травление подложек.
 - Термообработка.
 - Ионное травление (теория, коэффициент распыления).
6. Травление подложек в диодных камерах.
7. Ионно-плазменное травление в триодных камерах.
8. Ионно-лучевое травление.
9. Газовое травление.
10. Методы формирования топологии микросхем.
 - Этапы и основные операции литографического процесса.
 - Прямая и обратная литография.
11. Оптическая литография.
 - Фотошаблоны, методы нанесения слоя фоторезиста.
 - Термообработка (первая сушка).
12. Формирование фотомаски – создание топологического рисунка (экспонирование, проявление, 2-ая сушка).
 - Экспонирование контактным способом.
 - Экспонирование с микрозазором.
 - Проекционное экспонирование.
 - Проявление.
13. Электронная литография.
 - Сканирующая электронная литография.
 - Проекционная литография.
14. Методы получения тонких пленок.
 - Термическое напыление.
 - Основы метода (4-ре этапа).

- *Образование пара, распространение пара (средняя длина свободного пробега частиц), конденсация пара на поверхности подложки, образование зародышей.*
- 15. Методы и техника термо-вакуумного напыления.
- 16. Испарение методом ионной бомбардировки.
 - *Основы метода, образование потока частиц, конденсация, образование зародышей.*
 - *Физическое катодное распыление.*
 - *Реактивное катодное распыление.*
- 17. Ионно-плазменное распыление.
- 18. Высокочастотное распыление.
- 19. Магнетронное распыление.
- 20. Термическое оксидирование.
 - *основы метода*
 - *техника процесса*
 - *термическое оксидирование при повышенном давлении*
 - *термическое оксидирование с добавлением HCl*
- 21. Химическое осаждение из парогазовой фазы
 - *основы метода*
 - *осаждение пленок SiO₂*
 - *пиролитическое разложение тетраэтоксисилана и моносилана*
 - *осаждение пленок нитрида кремния*
 - *осаждение пленок тугоплавких металлов*
- 22. Контроль параметров пленок в процессе осаждения
 - *резистивный метод*
 - *частотный метод*
 - *фотометрический метод*
- 23. Диффузионное легирование
 - *Основы метода*
 - *первое и второе уравнения Фика*
 - *диффузия из постоянного бесконечного источника*
 - *диффузия из ограниченного источника*
 - *особенности диффузии при изготовлении микросхем (двухстадийная диффузия)*
 - *техника выполнения диффузионного процесса*
- 24. Эпитаксия из парогазовой фазы
 - *эпитаксия кремниевых слоев*
 - *хлоридный метод*
 - *силановый метод*
 - *легирование из газовых и жидких источников*
- 25. Основы метода жидкостной эпитаксии
 - *классификация методов жидкостной эпитаксии*
 - *жидкостная эпитаксия полупроводниковых соединений АЗВ5*
 - *расчет толщины эпитаксиального слоя*
- 26. Метод газофазной эпитаксии полупроводниковых соединений АЗВ5 из металлоорганических соединений.
- 27. Выращивание соединений АЗВ5 методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).
- 28. Особенности формирования пленки в методе МЛЭ на примере арсенида галлия.

4.2. Образцы экзаменационных билетов

Билет 1

1. Классификация и основные этапы технологии изготовления микросхем.

- *Основные конструктивные элементы микросхем*
- *Классификация микросхем*
- *Основные этапы технологии изготовления микросхем*

2. Этапы и основные операции литографического процесса.

Билет 2

1. Основные принципы интегральной технологии

- *Принцип совместимости элементов*
- *Принцип локальности технологических обработок*

2. Сухая очистка и травление

- *термообработка*
- *ионное травление*
- *травление в диодных камерах*

Билет 3

1. Основные технологические методы изготовления структур.

- *Планарная технология (свободная маска, контактная маска)*
- *Мезотехнология (преимущества и недостатки)*

2. Сухая очистка и травление

- *ионно-плазменное травление в триодных камерах*
- *ионно-лучевое травление*
- *газовое травление*

5. Методический блок

5.1. Методика преподавания, обоснование выбора данной методики

Преподавание данного курса основывается на :

- Проведение лекционных занятий согласно тематическому плану.
- Контроль усвоенного материала
- Организацию самостоятельной работы студентов.

