

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»

“УТВЕРЖДАЮ”

Начальник ОПКВК

В.П.Драгунов



2017 г.

ПРОГРАММА КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА

**По специальности 05.27.06 «Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники»**

Отрасль науки: технические

Степень: кандидат наук

Новосибирск

2017

Программа составлена на основании федеральных государственных требований к структуре основной образовательной программы послевузовского профессионального образования (аспирантура), утвержденных приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 16.03.2011 г. № 1365.

Программа обсуждена на заседании ученого совета факультета _____
протокол № 3 от 22 марта _____ 2017 г.

Программу разработал

Доцент кафедры электронных приборов,

к.т.н., доцент



(Беркин А.Б.)

Декан РЭФ,

д.т.н., профессор



(Хрусталев В.А.)

Ответственный за основную
образовательную программу

д.т.н., профессор



(Макуха В.К.)

ПРОГРАММА-МИНИМУМ

кандидатского экзамена

05.27.06 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники»

по техническим наукам

Введение

В основу данной программы положены следующие вузовские дисциплины: кристаллография; методы исследования состава и структуры материалов электронной техники; физика и химия полупроводников; квантовая и оптическая электроника, технология материалов электронной техники; физико-химические основы технологии микроэлектроники; процессы микро- и нанотехнологии; физические основы электронной техники; основы технологии производства изделий электронной техники; оборудование электронной промышленности; расчет и конструирование оборудования электронной промышленности; моделирование процессов и оборудования электронной промышленности.

Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по электронике, измерительной технике, радиотехнике и связи при участии МИЭМ, МИЭТ и МЭИ (ТУ) (http://www.edu.ru/db/pke/052706_01.htm)

1. Физические и физико-химические основы электронной техники

Основы кристаллографии. Симметрия кристаллов и анизотропия их свойств. Атомные и ионные радиусы. Химическая связь. Соотношение ионных радиусов и структура кристаллов. Типы структур кристаллов.

Структура и симметрия идеальных и реальных кристаллов; основные типы дефектов кристаллической структуры. Политипизм и полиморфизм. Термодинамика дефектов кристаллической решетки. Собственные и примесные дефекты в элементарном кристалле; точечные и протяженные дефекты. Температурная зависимость равновесных концентраций дефектов. Влияние дефектов на физические и химические свойства кристаллов – параметры решетки, плотность, пластичность, диффузию, электропроводность, оптические и магнитные свойства, теплопроводность, теплоемкость, коррозионную устойчивость и др.

Дефекты, вызванные инородными примесями. Влияние примесей на равновесие собственных дефектов. Физико-химические основы процессов легирования. Изменение валентности примесных ионов. Взаимосвязь ионной и электронной разупорядоченности в кристаллах. Взаимное влияние примесей на их растворимость в кристаллической фазе. Современные методы исследования концентрации и распределения дефектов, вызванных нарушениями стехиометрии кристалла. Взаимодействие дефектов.

Механизмы диффузии. Элементы математического описания диффузионных процессов. Особенности, диффузии по вакансиям, дислокациям и по поверхности кристаллов. Связь между подвижностью носителей заряда и коэффициентом диффузии. Проявление зависимости: электропроводность – концентрация дефектов – давление – температура. Процессы, контролируемые дефектами при спекании кристаллов. Кинетика гетерогенных процессов и ее методы в технологии получения кристаллов с дефектами. Основные закономерности топохимических реакций. Методы определения кинетических констант.

Дифракция в кристаллах и обратная решетка; упругие колебания в кристаллах, оптические и акустические фононы; тепловые свойства кристаллов; модель свободных электронов, основы зонной теории, классификация твердых тел, статистика электронов.

Диэлектрические и магнитные свойства твердых тел, оптические свойства, ферромагнетизм, сегнетоэлектричество, сверхпроводимость.

Электрические свойства металлов, диэлектриков и полупроводников. Зонная теория идеальных и реальных полупроводников. Основные определения. Зонная структура энергетического спектра носителей заряда. Распределение Ферми-Дирака. Электропроводность металлов, полупроводников и диэлектриков и их физическая природа.

да. Собственные и примесные полупроводники. Доноры, акцепторы, глубокие центры. Диффузия и дрейф носителей, генерация и рекомбинация, электронно-дырочный переход; поверхностные электронные состояния, эффект поля.

Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Поглощение и отражение света. Эффект Фарадея. Фотопроводимость. Фотоэффект. Эмиссия света из полупроводников. Межзонная излучательная, безизлучательная и ударная рекомбинация. Катодо-, фото- и электролюминесценция. Излучательная рекомбинация. Когерентное излучение. Поверхностные состояния в полупроводниках; слои обогащения, инверсии и обеднения. Полупроводники в сильном электрическом поле. Влияние сильного электрического поля на подвижность носителей заряда. Эффект Франца—Келдыша. Эффект Ганна.

Поляризация диэлектриков и ее физическая сущность. Неполлярные и полярные диэлектрики. Проводимость диэлектриков и ее физическая природа. Диэлектрические потери и их природа.

Элементарные процессы зародышеобразования и роста кристаллов. Существующие теории роста на атомно-гладкой и атомношероховатой поверхности, теории нормального и непрерывного роста. Теоретические основы кристаллизационных методов очистки и выращивания монокристаллов.

Гетерогенные равновесия. Условия стабильности и равновесия фаз. Типы диаграмм фазовых равновесий двух- и многокомпонентных систем. Диаграммы как источник информации необходимой для выбора и оптимизации метода синтеза материалов с заданным составом и свойствами, определение условий их стабильного существования.

Понятие о фазах переменного состава. Отображение явлений нестехиометрии на диаграммах состояния. Р-Т-Х – диаграмма, как источник информации для получения кристаллов с заданным отклонением от стехиометрии.

Основные принципы термодинамики неравновесных процессов. Термодинамика неравновесных процессов в технологии материалов электронной техники. Характеристика открытых и непрерывных систем. Составление материальных и энергетических балансов. Стационарные состояния в непрерывных системах. Истолкование процессов кристаллизации с позиций неравновесной термодинамики.

Основы физической химии высокодисперсных систем. Принципы создания наноконпозиционных материалов. Термодинамическая стабильность наноразмерных материалов. Фазовые и структурные переходы в сверхтонких (поверхностных) системах. Теория зародышеобразования при формировании новой фазы на поверхности и в объеме твердого тела. Образование дисперсных структур на поверхности и в объеме при эпитаксии, ионной имплантации и термообработке.

Поверхность как особая область твердого тела. Идеальная и реальная поверхность твердого тела. Структурно-механические свойства поверхности: микро- и шероховатость, микро- и нанопористость, микротрещины, краевые и винтовые дислокации, точечные дефекты; триботехнические характеристики поверхности, коэффициент трения скольжения, износостойкость, антифрикционные слои. Электрофизические свойства поверхности: зарядовые состояния, встроенный и индуцированный заряды, электростатическое взаимодействие заряженных поверхностей; поверхностно-активные вещества; термоэлектронная, электронная и ионно-полевая эмиссии; электромагнитное взаимодействие, электромагнитная индукция, токи индуцированные электромагнитными полями, скин-эффект. Проявление размерных эффектов и эффектов масштабирования при электростатических и электромагнитных взаимодействиях.

Основы кинетической теории газов. Распределение Максвелла—Больцмана. Средние значения скорости движения, длины свободного пробега и числа столкновений молекул. Явления переноса. Режимы течения газов. Вакуум, методы получения и измерения. Испарение. Зависимость давления насыщенных паров от температуры. Газовый разряд. Ионизация газов, ионизационный потенциал. Рекомбинация. Вольт-амперная характеристика несамоостоятельного разряда. Тлеющий, дуговой, искровой и коронный разряды. Плазма и ее свойства. Характеристики плазмы (изотермичная, не изотермичная, равновесная, неравновесная, высоко-, низкотемпературная, идеальная, неидеальная). Ионизованный газ и плазма; элементарные процессы в плазме и на пограничных поверхностях; основные методы генерации плазмы; модели для описания свойств плазмы; типы газовых разрядов; общие свойства плазмы: явления переноса, плазма в магнитном поле, колебания, неустойчивости и эмиссионные свойства плазмы, излучение плазмы.

Физика процессов генерации плазмы в газовых разрядах: тлеющем, дуговом, высокочастотном (ВЧ) и сверхвысокочастотном (СВЧ). Разряды во внешнем магнитном поле, движение частиц в плазме. Взаимосвязь между рабочими, технологическими и конструктивными параметрами разрядных систем. Математические модели процессов и устройств, вольт-амперные характеристики разрядов.

Электронная эмиссия. Основы электронной теории твердого тела, термоэлектронная, автоэлектронная, взрывная, вторично-электронная, фотоэлектронная эмиссия. Электронный поток, его формирование и транспортировка: интенсивные и неинтенсивные, релятивистские и нерелятивистские электронные потоки.

2. Материалы электронной техники и технологии их получения

Общая классификация материалов по составу, свойствам и техническому назначению. Физическая природа электропроводности металлов, сплавов, полупроводников, диэлектриков и композиционных материалов; сверхпроводящие металлы и сплавы; характеристика проводящих и резистивных материалов во взаимосвязи с их применением в электронной технике.

Элементарные полупроводники. Физико-химические, электрофизические и оптические свойства. Современные методы выращивания монокристаллов элементарных полупроводников. Принципы выращивания структурно-совершенных монокристаллов. Микродефекты в монокристаллах кремния. Механическая, химико-механическая, химическая обработка и очистка поверхности полупроводников.

Полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$. Физико-химические, электрофизические и оптические свойства. Синтез и выращивание объемных монокристаллов соединений $A^{III}B^V$ в связи с Р-Т-Х диаграммами. Методы кристаллизации и легирования. Тройные диаграммы состояния $A^{III}B^V$ – примесь. Компенсация и получение полуизолирующих кристаллов. Специфика подготовки подложек различных соединений $A^{III}B^V$. Влияние кристаллографических ориентаций. Травление жидкостное, расплавленное, газовое.

Получение широкозонных материалов – нитриды галлия, алюминия, бора. Эпитаксия арсенида галлия, фосфида галлия, арсенида индия, антимонида индия и твердых растворов. Применение соединений $A^{III}B^V$ в СВЧ-технике, оптоэлектронике, квантовой электронике.

Полупроводниковые соединения $A^{II}B^{VI}$ и $A^{IV}B^{VI}$. Физико-химические, электрофизические и оптические свойства. Синтез и выращивание монокристаллов соединений с двумя летучими компонентами. Методы выращивания монокристаллов из газовой фазы и из расплава. Эпитаксия соединений. Методы управления стехиометрическим составом. Термообработка. Особенности получения соединений: сульфида кадмия, селенида кадмия, теллурида кадмия, сульфида свинца, твердых растворов. Области применения кристаллов: лазеры, оптические модуляторы, акустоэлектронные приборы, ИК-фотоприемники.

Аморфные полупроводники. Аморфный кремний и сплавы на его основе. Применение аморфного кремния в фотоэлектрических преобразователях. Физико-химические, электрофизические и оптические свойства. Понятие о физико-химических механизмах переключения памяти и оптической записи информации в халькогенидных стеклах. Особенности стеклообразования в халькогенидных системах и в оксидных системах. Синтез стеклообразных полупроводников и их свойства.

Магнитные материалы. Металлы и сплавы, ферриты, магнитодиэлектрики, магнитные полупроводники, аморфные интерметаллические соединения. Магнитные пленки. Цилиндрические магнитные домены (ЦМД). Методы их получения и контроля. Принцип действия запоминающих устройств на ЦМД.

Материалы вакуумной электроники. Требования к чистоте материалов и их газосодержанию. Основные требования, предъявляемые к материалам для получения вакуумплотных соединений. Особенности технологии изготовления корпусов ИС на основе металлов и стекловидных материалов: стекол, ситаллов и композиционных материалов.

Материалы оптоэлектроники. Излучательные свойства твердых тел. Излучение света в полупроводниках. Полупроводники с прямой и непрямой запрещенной зоной. Материалы полупроводниковых светодиодов, лазеров и фотоприемников. Активные диэлектрики ($LiNbO_3$, $LiTaO_3$, $KTiOPO_4$), их физико-химические и оптико-физические свойства. Их применение в оптоэлектронике. Материалы для изготовления волоконных и планарных оптических волноводов.

Материалы акустоэлектроники. Пьезоэлектрики. Пьезоэлектрические свойства монокристаллов и текстурированных материалов. Сегнетоэлектрики.

Наноматериалы. Современные технологические методы формирования наноструктурированных материалов. Методы литографии высокого разрешения. Эпитаксиальные методы. Электрохимические методы. Золь-гель технология. Методы молекулярного наслаивания.

Органические материалы в электронной технике. Органические полимерные диэлектрики. Методы получения полимеров реакциями полимеризации и поликонденсации. Радикальные и ионные процессы. Типы органических полимеров, их строение и свойства. Применение металлоорганических соединений (МОС) в микроэлектронике. Типы МОС, методы синтеза и разложения металлоорганических соединений. Применение металлоорганических соединений для получения чистых металлов, диэлектрических пленок, полупроводниковых соединений.

Неорганические стекловидные диэлектрики в электронной технике и в микроэлектронике. Требования к диэлектрикам различного назначения и области их применения: подложки, материалы для бескорпусной защиты, пассивации, герметизации ИС, межслойной и межкомпонентной изоляции ИС, трехмерных структур, структур «кремний на изоляторе», изоляции электродов газоразрядных индикаторных панелей, элементов интегральной оптики и акустоэлектроники.

Сверхпроводящие материалы. Кристаллическая структура и изотипический эффект. Эффект Джозефсона. Высокотемпературные керамические сверхпроводники. Технология изготовления.

Фоторезисты. Определение и классификация. Требования к фоторезистам. Разрешающая способность и химическая стойкость. Основные фототехнические характеристики фоторезистов. Позитивные и негативные фоторезисты. Фотохимические реакции в процессе фотолитографии. Материалы, используемые для производства фоторезистов и проведения процессов литографии. Электронорезисты и рентгенорезисты. Их характеристики. Технология производства.

Исходные вещества, используемые для производства монокристаллов и пленок. Особо чистые элементы и материалы, их роль в современной технике. Понятие о чистоте вещества, методы определения и оценка чистоты. Физико-химические основы глубокой очистки веществ. Понятие о коэффициенте разделения и распределения. Методы очистки. Зонная очистка. Сублимация. Ректификация. Хроматографическая очистка. Экстракция, Электролиз. Методы получения гидридов, хлоридов металлов и металлоорганических соединений.

3. Физические основы приборов электронной техники

Свойства р-п перехода. Кинетические явления в полупроводниках. Электро- и теплопроводность полупроводников. Рассеяние носителей заряда. Эффект Холла. Магнетосопротивление. Диффузия носителей и примесей. Невыпрямляющие контакты. Работа выхода. Эмиссия электронов. Термо-ЭДС. Эффект Пельтье.

Физические основы работы основных типов полупроводниковых приборов: диодов, биполярных и полевых транзисторов, тиристоров, диодов Ганна.

Явления переноса в твердых телах, контактные явления в полупроводниках, контакт металл—полупроводник и металл—диэлектрик—полупроводник (МДП), электронно-дырочный переход, изотипные и анизотипные гетеропереходы; полупроводниковые диоды, биполярные транзисторы, тиристоры, МДП-транзисторы, полевые транзисторы с управляющим переходом.

Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях; траектория движения частиц в комбинированных полях. Электровакуумные и газоразрядные приборы: приемно-усилительные лампы, приборы СВЧ, фотоумножители, лучевые приборы, электронно-оптические преобразователи, газоразрядные приборы.

Источники излучения. Физические основы работы лазеров. Газовые и твердотельные лазеры. Полупроводниковые светодиоды и лазеры. Классификация и принцип работы. Полупроводниковые лазеры на гетеропереходах. Технология изготовления.

Оптические волноводы. Принципы каналирования излучения. Волоконные, планарные и канальные волноводы. Основные компоненты систем оптической связи со спектральным уплотнением. Оптические усилители. Интегрально-оптические элементы.

Способы управления оптическим излучением. Электрооптические эффекты, фотоупругий эффект, магнитооптический эффект. Принципы нелинейной оптики. Преобразование частоты оптического излучения в волноводных структурах.

Пьезоэффект. Основные принципы акустоэлектроники. Принцип работы пьезоэлектрических резонаторов и монокристаллических пьезоэлектрических фильтров.

Приборы с зарядовой связью. Физика работы. Области применения.

Фотоэлектронные приборы, Фотоприемники и солнечные батареи. Полупроводниковые фотоприемники, полупроводниковые датчики, сенсорные устройства и преобразователи. Принципы действия и характеристики.

Квантово-размерные эффекты в полупроводниковых и диэлектрических нанокристаллах, их влияние на оптические свойства (люминесценция, поглощение, фононные спектры, двулучепреломление). Оптоэлектронные приборы на основе наноструктурированных полупроводников (квантовые точки и нити). Фотонные кристаллы.

Элементы микросистемной техники. Микромеханические сенсоры. Механические конструкции: объемные, мембранные, балочные, струнные. Виды преобразователей: пьезоэлектрические, тензорезистивные, емкостные. Датчики на основе микромеханических преобразователей: давления, расхода, пульсаций, смещения, силы, ускорения, крена, микрогирометры, микрофоны. Микромеханические приводы движения: пьезоэлектрические, емкостные, термомеханические, электромагнитные, пневматические актуаторы. Устройства микросмещения, микропозиционирования и микрозахвата. Микро- и наноманипуляторы.

4. Технология получения структур микроэлектроники

Методы эпитаксии кремния из газовой фазы. Легирование и автолегирование. Особенности выращивания структур со скрытыми слоями. Газофазная эпитаксия. Хлоридный, хлоридно-гидридный и МОС-гидридный методы. Жидкостная эпитаксия и области ее применения. Механизм кристаллизации из раствора в расплаве. Фазовое равновесие. Равновесная и неравновесная кристаллизация. Коэффициент распределения примесей. Молекулярно-лучевая эпитаксия.

Структуры для СВЧ-транзисторов, диодов Ганна и Шоттки. Особенности получения тонких слоев с заданной неоднородностью распределения примесей.

Структуры со скрытыми слоями. Получение структур с диэлектрическими и поликристаллическими слоями.

Получение структур «кремний на изоляторе» (КНИ). Методы формирования КНИ структур. Методы прямого и непрямого срачивания для формирования структур КНИ. Глубокая имплантация ионов кислорода и азота. Расчет требуемых доз и энергий. Отжиг рекристаллизации ионно-имплантированных структур. Дефекты в ионно-имплантированных структурах КНИ. Формирование КНИ-структур методом окисления пористого кремния. Технология получения гетерослоев кремния на сапфире. Особенности получения и электрофизические свойства слоев.

Структуры полупроводник-диэлектрик. Методы получения и основные электрофизические свойства структур диэлектрик-германий. Структуры диэлектрик – антимонид индия. Технология получения структур электрохимическим окислением. Электрофизические свойства структур. Основные нестабильности и методы их уменьшения. Структуры диэлектрик-арсенид галлия. Методы получения и электрофизические свойства. Основные трудности изготовления структур.

Структуры оптоэлектроники. Технология получения гетероструктур для лазеров и светодиодов. Планарные и канальные оптические волноводы. Особенности получения многослойных структур. Технология получения структур для солнечных батарей.

Процессы толстопленочной технологии. Приготовление порошков и паст для проводников и резисторов на основе палладия, серебра, золота, рутения, иридия, кадмия. Получение резисторов на основе окислов редких ме-

таллов, боридов, карбидов и нитридов. Приготовление порошков и диэлектрических паст на основе титанатов бария, кальция, висмута и др.

Процесс ионного распыления материалов. Особенности распыления металлов и диэлектриков. Зависимость коэффициентов распыления различных факторов. Закономерности удаления материала с распыляемой поверхности и особенности их использования в технологических процессах микроэлектронного производства. Моделирование процессов распыления.

Применение ионно-плазменных распылительных систем для нанесения и травления материалов. Физико-технологические основы процессов осаждения пленок и травления материалов. Модели процессов осаждения и травления материалов.

Методы нанесения тонких пленок в вакууме: вакуум-термический, термоионный, электронно-лучевой, ионно-плазменный (с использованием разрядов на постоянном токе (ПТ), а также ВЧ и СВЧ разрядов), с помощью автономных ионных источников. Магнетронные распылительные системы.

Активные индикаторы. Электронно-лучевые трубки, светоизлучающие диоды, электролюминесцентные, газоразрядные индикаторы и др. Пассивные индикаторы. Жидкокристаллические, электрохромные индикаторы, индикаторы на PLZT-керамике и др. Сравнительные характеристики активных и пассивных индикаторов. Жидкокристаллические материалы. Основные электрооптические эффекты в жидких кристаллах.

Нанотехнология. Современные технологические методы формирования наноструктур. Процессы самоорганизации и самоформирования в технологии наноструктур. Проблемы создания упорядоченных наноструктурированных материалов на большой площади.

5. Методы исследования материалов и элементов электронной техники

Методы измерения электрических параметров полупроводников. Измерение подвижности, удельного сопротивления, концентрации носителей, доноров и акцепторов. Способы измерения толщины эпитаксиальных слоев. Характеристики однородности электрических свойств слоев на площади и толщине. Методы определения профиля распределения легирующих примесей. Измерение электрофизических параметров структур диэлектрик-полупроводник методом вольтфарадных характеристик.

Методы исследования реальной структуры кристаллов, определения фазового состава, прецизионного измерения параметров решетки. Методы изучения объемных дефектов. Дифракция медленных электронов. Обратное рассеяние ионов.

Исследование строения поверхностных слоев монокристаллов. Метод Берга-Барретта. Оценка совершенства кристаллов с помощью двухкристального спектрометра. Методы просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии и примеры ее использования.

Оптические методы металлографических исследований. Наблюдение объектов в поляризованном свете. Топография поверхности. Наблюдение микродефектов поверхности эпитаксиальных слоев. Принципы двухлучевой и многолучевой интерферометрии и их применение. Выявление дислокаций методом травления. Механизм формирования ямок травления на дислокациях.

Методы определения химического состава. Химические методы анализа: экстракция, хроматография, полярография, потенциометрия. Объемный анализ. Гравиметрия. Спектральный анализ. Атомно-адсорбционный анализ. Люминисцентный метод. Молекулярная спектроскопия. Электронный парамагнитный резонанс, ядерный парамагнитный резонанс. Нейтронно-активационный анализ. Метод радиоактивных индикаторов, Оже-спектроскопия, рентгено-флуоресцентный анализ, лазерная и вторично-ионная масс-спектроскопия.

Методы определения деформаций в структурах микроэлектроники. Определение тензора деформаций с помощью двухкристальной рентгеновской дифрактометрии. Полярография. Определение деформаций по прогибу пластин.

Методы исследования наноструктур. Электронная микроскопия. Оптика ближнего поля. Туннельная и атомно-силовая микроскопия.

6. Технология и оборудование производства изделий электронной техники

Современные тенденции развития технологии СБИС и УБИС. Нанотехнология. Основные требования технологии к разрабатываемому технологическому оборудованию (ТО), направления развития ТО. Методы проектирования технологического оборудования для получения субмикронных и наноразмерных структур. Системный подход к выбору оптимальных технических решений методами моделирования и формально эвристического проектирования.

Особенности проектирования многомодульного (кластерного) оборудования. Системы контроля и управления процессами обработки в технологическом оборудовании нанесения и травления материалов.

Проектирование транспортного и манипуляционного оборудования по критериям минимальной привносимой дефектности. Микромеханика и мехатроника в составе прецизионного оборудования электронной техники. Методы проектирования высоконадежного оборудования на основе использования не механических способов перемещения и ориентации изделий относительно источника технологического воздействия не содержащих пар трения: электрические и магнитные поля, упругие силы и др.

Проблемы комплексной автоматизации производства на современном уровне. Техничко-экономический анализ технологического и производственного процесса. Общие принципы автоматизации оборудования. Автоматические линии в производстве изделий электронной техники (ИЭТ). Методы определения оптимальных параметров линий и комплексов в производстве ИЭТ. Общие сведения об управлении технологическими процессами а оборудованием. ЭВМ и информационно-управляющие комплексы. Гибкие автоматизированные системы управления технологическими процессами и производством.

Системный подход к организации современного полупроводникового производства и разработке ТО. Математическое моделирование и системы автоматизации проектирования (САПР) как основа создания высокоэффективных технических систем. Методы математического моделирования объектов различных иерархических уровней. Геометрическое моделирование и системы компьютерной графики.

Методология проектирования технических систем. Основные компоненты и процедурная модель проектирования. Формализация основных процедур проектирования. Оптимальное проектирование технических систем. Методы оптимизации. Поисковые методы математического программирования. Общие методы многокритериальной оптимизации.

Обеспечение и поддержание в чистых помещениях среды с заданными параметрами. Проблема привносимой дефектности при производстве СБИС. Экологические аспекты субмикронной и нанотехнологии. Модели выхода годных СБИС. Принципы организации чистых производственных помещений. Создание средств технологической экологии при производстве СБИС и УБИС. Транспортные и загрузочные системы микроэлектроники (подвижные работы, тунельно-трековые системы, системы со стандартным механическим интерфейсом (СМИФ)). Кластерный принцип организации полупроводникового производства.

Образование и распространение аэрозольных частиц в технологических объемах микроэлектроники. Механизм разрушения трущихся поверхностей и интенсивность генерации загрязняющих частиц узлами технологического оборудования. Перенос и диффузия аэрозольных частиц в среде. Моделирование теплопереноса в чистых объемах микроэлектроники. Физико – химические аспекты подлета, осаждения и удержания аэрозольных частиц на поверхности полупроводниковых пластин.

Способы формирования электронных потоков различной интенсивности (электронные пушки и прожекторы), транспортировка электронного потока и способы ограничения его поперечных размеров. Системы регулирования параметров пучка. Управление электронными потоками. Электрические и магнитные способы управления плотностью и скоростью электронов. Квазистатические и динамические способы управления. Примеры использования в приборах вакуумной электроники и технологическом оборудовании.

Преобразование энергии электронного потока в другие виды энергии: способы, основанные на взаимодействии с внешними электромагнитными полями, энергетический эффект взаимодействия; способы, основанные на взаимодействии с твердыми телами и структурами, эффекты взаимодействия (катодолюминисценция, катодоусиление, рентгеновское излучение, нагрев). Методы расчета и конструирования функциональных элементов и си-

стем оборудования, использующего в технологических целях потоки заряженных частиц. Методы расчета и конструирования источников формирования электронных и ионных пучков.

Методы очистки исходных материалов и структур; оборудование, применяемое для очистки.

Технология и оборудование для выращивания монокристаллов. Особенности конструктивного выполнения ТО и его основных узлов и систем. Особенности выращивания из расплава элементарных полупроводников. Оптимизация равномерного распределения легирующих примесей в монокристаллах. Технология и оборудование получения полупроводникового кремния и германия. Выращивание монокристаллов германия и кремния с совершенной структурой. Особенности технологии полупроводниковых соединений. Методы контроля и стабилизации параметров процесса выращивания монокристаллов, система автоматического управления процессом.

Технология и оборудование для получения тонких пленок в вакууме: вакуум-термическое испарение, электронно-лучевое испарения, высокочастотное распыление диэлектриков, ПТ и ВЧ магнетронное распыление, реактивное ионное распыление, Осаждение пленок в плазме из парогазовых смесей. Особенности проектирования, расчета и моделирования узлов и систем технологического оборудования нанесения пленок. Методы и оборудование осаждения пленок сложного состава, реактивное распыление материалов.

Технология и оборудование для получения эпитаксиальных слоев. Принципиальные схемы проведения эпитаксиальных процессов. Промышленные методы эпитаксиального наращивания и виды применяемого оборудования. Эпитаксия при пониженных давлениях, молекулярно – лучевая эпитаксия. Технические требования, предъявляемые к оборудованию. Типы промышленных установок. Методы контроля и стабилизации параметров эпитаксиальных процессов. Микропроцессорное управление процессами эпитаксии. Моделирование работы эпитаксиального оборудования. Алгоритмы и программы расчета и моделирование процесса и основных элементов ТО эпитаксии.

Технология и оборудование для создания *p-n* переходов. Методы получения *p-n* переходов, гетеропереходов и переходов металл—полупроводник. Диффузионные методы легирования. Ионное легирование (имплантация). Оборудование для процессов ионной имплантации.

Основы технологии контактной, дуговой, холодной сварки и пайки. Методы получения вакуумноплотных соединений. Клеевые соединения. Методы контроля герметичности. Оборудование для создания межсоединений и герметизации готовых приборов. Пластмассовая герметизация полупроводниковых приборов, ИМС. Методы пассивации и защиты полупроводниковых приборов и ИМС. Технология и оборудование для пластмассовой герметизации ИЭТ.

Методы и технология откачки и газозаполнения электровакуумных и газоразрядных приборов. Откачка удалением и связыванием. Криогенная откачка. Вакуумное технологическое оборудование для формирования остаточной вакуумной среды в электронных приборах.

Термохимическое оборудование в производстве электровакуумных в полупроводниковых приборов. Принципы расчета и проектирования.

Электротермические устройства и системы. Принципы расчета и проектирования. Оборудование для получения диффузионных и диэлектрических слоев в термопечах. Требования процессов диффузии, окисления и осаждения из паро-газовых смесей к ТО. Особенности конструкций компонентов: термопечей, элементов газовакуумных систем, устройств утилизации продуктов реакций и др. Основы инженерного расчета газовых систем. Автоматическое управление диффузионной печью. Моделирование процессов и устройств получения диффузионных диэлектрических слоев.

Методы и оборудование травления микроструктур: ионное, реактивное ионное и плазмохимическое с использованием постоянного тока, ВЧ и СВЧ разрядов. Физика процессов, особенности проектирования и моделирования процессов, узлов и систем ТО. Системы с электронно-циклотронным резонансом. Методы анизотропного травления полупроводников (Bosh-процесс, ICP-процесс).

Технология и оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки. Прецизионное электроэрозионное оборудование для обработки деталей электронных приборов. Ультразвуковое оборудование для очистки поверхности и обработки хрупких материалов. Оборудование для обработки лучем лазера. Технология и оборудование электрохимической обработки.

Основы проектирования и расчета элементов газовых систем. Элементы, используемые в газовых системах термических установок и их гидродинамические характеристики. Типы и конструкции регулирующей и контрольной аппаратуры газовых систем термического оборудования. Конструкционные материалы газовых систем. Основы инженерного расчета газовых систем.

Контрольно-измерительное и испытательное оборудование. Современные принципы автоматизации технологических процессов измерения и контроля в процессе многооперационной обработки.

Современное аналитическое вакуумное оборудование. Методы получения высокого вакуума. Вторично-ионные масс-спектрометры, Оже-спектрометры, оборудование, использующее рентгеновское и лазерное излучение.

Литографические процессы в производстве полупроводниковых приборов. Анализ точности литографического процесса и определение требований к ТО. Сопоставительный анализ предельных возможностей процессов и ТО литографии, основанных на применении ультрафиолетового, лазерного и рентгеновского излучений, электронных и ионных пучков. Схемы процессов проектирования и формирования изображений на пластинах в производстве интегральных микросхем.

Оборудование оптической литографии (генераторы изображений, фотоповторители, установки совмещения и экспонирования и др.). Влияние дифракции и аберраций оптических систем на качество изображения. Методы машинного расчета влияния аберраций. Прецизионные системы координатных перемещений. Алгоритмы и программы расчета оптических систем и систем координатных перемещений.

Электронная литография. Классификация и принципиальные схемы электронно-лучевых и проекционных установок электронной литографии. Влияние различных факторов на качество изображения: аберраций, рассеяния электронов, эффектов близости и т.д. Конструкции, методы проектирования, расчета и моделирования основных узлов ТО электронной литографии: электронных пушек, систем формирования, переноса и отклонения пучков, систем совмещения, систем перемещения и позиционирования пластин. Современные проблемы и тенденции развития ТО электронной литографии.

Основные проблемы создания и внедрения рентгеновского литографического оборудования. Состав рентгено-литографической установки. расчет и моделирование основных ее узлов и параметров процесса экспонирования. Источники рентгеновского излучения, шаблоны для рентгенолитографии.

Ионно-лучевая литография (ИЛЛ). Направления развития ТО ИЛЛ и особенности создания систем экспонирования коллимированным ионным пучком (ИП), острое/фокусированным ИП и систем модульной ионной проекции изображения. Конструкции, сравнительные характеристики, методы расчета и моделирования основных узлов и систем ТО ИЛЛ: ионных источников, отклоняющих и сканирующих систем, систем ускорения и фокусировки.

Основные требования технологических процессов сварки и пайки к ТО сборки монтажа микросхем. Конструктивное выполнение установок, основных узлов и систем. Принципы расчета и проектирования узлов монтажно-сборочного оборудования. Критерии подобия сварочных процессов и их применения при проектировании оборудования.

Автоматизация монтажно-сборочного оборудования микроэлектроники. Адаптивные основы управления. Системы автоматической ориентации. Автоматизация проволоочного монтажа. Автоматизированное оборудование пайки. Применение промышленных роботов в монтажно-сборочном оборудовании. Системы автоматического управления ТО монтажа и сборки микросхем.

Основные виды контрольно-измерительных операций на различных стадиях изготовления полупроводниковых приборов и шаблонов. Контролируемые параметры, методы и приборы неразрушающего контроля.

Технологические микросистемы. Компоненты технологических микросистем: микроклапаны, микронасосы, микродозаторы, микросмесители, микросепараторы, микротранспортеры, микрореакторы. Микро- и нано- инструмент: микросхватыватели, микроножи, микроверла, микрозонды. Кластерные технологические микросистемы: микрохимические лаборатории, участки микросборки, минифабрики.

Основная литература

1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела: учебное пособие/ Г.И.Епифанов. – СПб. (и др.), 2010. – 287, [1] с.; ил., табл
2. Величко А.А. Методы исследования микроэлектронных и наноэлектронных материалов и структур, ч2: учебное пособие / А.А. Величко, Н.И. Филимонова; Новосиб. Гос. Тех. Ун-т. – Новосибирск, 2014. – 225, [1] с.: ил.
3. Драгунов В.П. Наноструктуры: физика, технология, применение : учебное пособие / В.П.Драгунов, И.Г.Неизвестный; Новосиб. Гос. Тех. Ун-т. – Новосибирск, 2008. 354, [1] с. :ил..
4. Барыбин А.А. Электроника и микроэлектроника физико-технологические основы: учебное пособие / А.А. Барыбин. – М., 2006. – 423 с., ил..
5. Кардона М. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит, 2002. - 506 с.
6. Калинина И.С. Расчет и конструирование чистых производственных помещений. М.: МИЭТ, 1998. – 194 с.

Дополнительная программа

кандидатского экзамена по профилю

05.27.06 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники»

по техническим наукам

1. Структура твердых тел. Виды межатомных связей. Типы кристаллических решеток. Индексы Миллера. Явление полиморфизма. Дефекты кристаллической решетки.
2. Зонная теория твердых тел. Тепловые колебания решетки. Фононы. Теплоемкость твердого тела. Теплопроводность. Тепловое расширение твердых тел.
3. Зонная теория твердых тел. Энергетический спектр электронов в кристалле. Эффективная масса электрона. Металлы. Диэлектрики. Собственные и примесные полупроводники. Положение уровня Ферми. Равновесные и неравновесные носители в полупроводниках.
4. Электропроводность твердых тел. Дрейф электронов в электрическом поле. Электропроводность вырожденного и невырожденного газа. Закон Видемана-Франца. Электропроводность металлов и сплавов. Собственная и примесная электропроводность полупроводников. Эффект сильного поля.
5. Контактные явления. Работа выхода. Контакт двух металлов. Контакт металл-полупроводник. Контакт двух полупроводников.
6. Полупроводниковые приборы. Полевые транзисторы. Биполярные транзисторы.
7. Термоэлектрические и гальваномагнитные явления. Эффекты Зеебека, Пельтье, Томсона, Холла, Нернста, Эттингсгаузена
8. Твердотельная фотоэлектроника. Оптические свойства твердых тел. Поглощение и испускание света твердым телом. Внутренний фотоэффект. Фотопроводимость. Приборы твердотельной фотоэлектроники.
9. Вакуумные фотоэлектронные приборы. Фотоумножители. Электронно-оптические преобразователи. Детекторы излучений.
10. Перспективы развития технологии ЭОП и приборов ночного видения. Классификация ЭОП и ПНВ. Основные характеристики ЭОП 2 и 3 поколений. ЭОП 4 поколения. Основные параметры приборов. Методика измерения параметров ЭОП.

11. Фотокатоды. Мультищелочные катоды. Катоды с отрицательным сродством. Технология получения, специфика эксплуатации, возможности расширения спектрального диапазона.
12. МКП. Принцип работы МКП. Технология получения. Параметры МКП и проблемы, связанные с их улучшением
13. Люминисценция. Закон Стокса. Закон Вавилова. Типы люминофоров. Люминисцентные экраны.
14. Альтернативные конструкции ЭОП и ПНВ 4 поколения с использованием ПЗС матриц
15. Основные задачи техники и технологии ЭОП на современном этапе. Перспективные разработки в области технологии ЭОП
16. Технология сборки ЭОП. Сверхвысоковакуумная линия сборки. Технологические требования к оборудованию. Основные операции на линии сборки ЭОП.
17. Методы получения сверхвысокого вакуума. Откачное оборудование и средства измерения СВВ.
18. Методы определения химического состава. Спектральный анализ. Атомно-адсорбционный анализ. Люминисцентный метод. Молекулярная спектроскопия. Электронный парамагнитный резонанс, ядерный парамагнитный резонанс. Нейтронно-активационный анализ. Метод радиоактивных индикаторов, Оже-спектроскопия, рентгено-флуоресцентный анализ, лазерная и вторично-ионная масс-спектроскопия.
19. Квантоворазмерные структуры. Квантовые ямы. Сверхрешетки. Квантовые нити и точки. Оптические свойства квантовых структур. Методы исследования наноструктур
20. Методы получения монокристаллических материалов. Методы кристаллизации из расплавов. Маркировка и основные свойства моно – и поликристаллических полупроводников.
21. Основные технологические операции изготовления ИС. Литография. Эпитаксия. Диффузия. Имплантация.
22. Технология тонких пленок. Механизмы роста тонких пленок. Методы нанесения тонких пленок.
23. Ионно-плазменная обработка поверхности твердых тел. Ионное травление. Катодное распыление. Плазмохимическая обработка .
24. Теория адсорбционных процессов Ленгмюра. Изотермы адсорбции.
25. Физика вакуума. Сверхвысокий вакуум. Методы получения и контроля СВВ.
26. Методы обезгаживания материалов. Термическое, электроннолучевое обезгаживание. Ионно-плазменная обработка.
27. Роль СВВ в технологии электронных приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела: учебное пособие/ Г.И.Епифанов. – СПб. (и др.), 2010. – 287 с.
2. Ю П., Кардона М. Основы физики полупроводников. – М., Физматгиз, 2002, 506с.
3. Филачев А.М, Таубкин И.И, Тришенков М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. М., Физматгиз, 2005. – 384с.
4. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. – М., Техносфера, 2004, 590с.
5. Шешин Е. П. Вакуумные технологии : [учебное пособие] / Е. П. Шешин. - Долгопрудный, 2009. – 345 с.

6. Эспе В. Технология электровакуумных материалов. М.: Госэнергоиздат. М.: Энергия, Т.1, 1962, Т.2, 1968, Т.3, 1969.
7. Технология тонких пленок: Справочник/ Под ред. Л.Майселла и Р.Глэнга; Пер.с англ. под.ред. М.И.Елинсона и Г.Г.Смолко. М.: Сов.радио, 1977. - т 1,2
8. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. - М.: Наука, 2010.- 591с.
9. Бертковский А. Г., Гаванин В. А., Зайдель И. Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. М.: Радио и связь, 1988, 227 с.
10. Китель Ч. Введение в физику твердого тела. - М., Физматгиз, 1963, 696с.

Правила выставления оценки на экзамене

При формировании оценки за экзамен учитываются три основных вопроса билета и дополнительные вопросы, формулируемые непосредственно в процессе ответа.

1. Оценка отлично – правильные и полные ответы на основные и дополнительные вопросы
2. Оценка хорошо – правильные ответы на основные вопросы. Неполные или неправильные ответы на дополнительные вопросы
3. Оценка удовлетворительно – неправильный ответ на один из основных вопросов и неполные ответы на дополнительные вопросы
4. Оценка не удовлетворительно – неправильный ответ на два основных вопроса