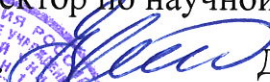



**Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Проректор по научной работе  
д.т.н. проф.  Драгунов В.К.



 2022 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА  
специальной дисциплины 2.2.2.Электронная компонентная база  
микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств**

Москва 2022

Программа составлена на основе паспорта специальности научных работников и программы - минимум кандидатского экзамена по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств, утвержденных экспертным советом Высшей аттестационной комиссии, и в соответствии с Положением о подготовке научных и научно- педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 30 ноября 2021г. № 2122.

## **ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Целью** дисциплины является изучение специальных разделов электроники, относящихся к процессам создания приборов современной электроники и наноэлектроники

**Задачами** дисциплины являются:

- освоение способности учитывать физические основы твердотельных структур для создания новых и совершенствованием существующих электронных компонентов микро- и наноэлектроники, квантовых устройств,
- развитие способности аргументированно выбирать информацию о физических основах структур и их влияния на характеристики электронных компонентов микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

## **МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ**

Специальная дисциплина в структуре программы аспирантуры входит в Блок 2 «Образовательный компонент. Общая трудоемкость составляет 7 зачетных единиц (з.е.).

## **Формула специальности**

Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств – специальность, занимающаяся разработкой и исследованием физических основ создания новых и совершенствования существующих приборов, интегральных схем, изделий микро- и наноэлектроники, твердотельной электроники, дискретных радиоэлектронных компонентов, микроэлектромеханических систем (МЭМС), наноэлектромеханических систем (НЭМС), квантовых устройств, включая оптоэлектронные приборы и преобразователи физических величин.

## **Области исследований:**

1. Физические основы создания новых и совершенствования существующих приборов, интегральных схем, изделий микро- и

нанoeлектроники, твердотельной электроники, дискретных радиоэлектронных компонентов, микроэлектромеханических систем (МЭМС), нанoeлектромеханических систем (НЭМС), квантовых устройств, включая оптоэлектронные приборы и преобразователи физических величин.

2. Физические и математические модели изделий электронной компонентной базы (ЭКБ), в том числе для систем автоматизированного проектирования.

3. Исследование и разработка схемотехнических основ создания, конструкций и методов совершенствования изделий ЭКБ.

4. Исследование, моделирование и разработка технологических процессов и маршрутов изготовления, методов измерения характеристик и совершенствования изделий ЭКБ.

5. Исследование, проектирование и моделирование изделий ЭКБ, исследование их функциональных и эксплуатационных характеристик, включая вопросы качества, долговечности, надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам, а также вопросы их эффективного применения.

### **Отрасль науки**

- технические науки;
- физико-математические науки.

### **Введение**

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: физика полупроводников и полупроводниковых приборов; технология полупроводниковых приборов и интегральных схем; микросхемотехника; контроль качества и надежность полупроводниковых приборов; радиокомпоненты, а также обзорно-обобщающие работы по новым достижениям в области оптоэлектроники, акустоэлектроники, нанoeлектроники и приборов на квантовых эффектах.

~~Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по электронике, измерительной технике, радиотехнике и связи при участии СТИ РАН, МИЭМ, МИРЭА, МИЭТ, МЭИ (ТУ) и ГУП «Пульсар».~~

### **Общие вопросы**

Предмет и структура современной электроники. Место электроники среди других наук. Основные исторические этапы развития электроники. Области применения электроники и перспективы ее дальнейшего развития.

### **Физика полупроводников и полупроводниковых приборов**

Общие свойства полупроводников. Природа химической связи.

Структура кристаллов. Идеальные и реальные кристаллы. Дефекты в

кристаллах. Свойства основных монокристаллических материалов микроэлектроники: Si, GaAs и др. Поликристаллические и аморфные полупроводники.

Зонная теория твердого тела. Энергетические спектры электронов в металлах, полупроводниках, диэлектриках. Зона проводимости и валентная зона. Электроны и дырки. Эффективная масса электрона. Экситоны.

Собственные и примесные полупроводники. Донорные и акцепторные примеси.

Основы статистической физики. Функция распределения Ферми-Дирака. Концентрация электронов и дырок в зонах и их температурные зависимости. Распределение Максвелла-Больцмана. Критерий вырождения электронного газа. Вырожденные и невырожденные полупроводники.

Рекомбинация носителей заряда. Рекомбинация «зона-зона» и рекомбинация через примеси и дефекты. Теория рекомбинации Шокли-Рида.

Диффузионная длина и время жизни носителей заряда. Поверхностная рекомбинация.

Электропроводность полупроводников. Носители заряда в слабом электрическом поле. Взаимодействие с фононами, примесными атомами, дефектами. Подвижность электронов и дырок. Условие электронейтральности. Диффузия и дрейф носителей заряда. Соотношение Эйнштейна. Носители заряда в сильном электрическом поле. Горячие электроны. Лавинное умножение в полупроводниках. Электрические домены и токовые шнуры. Эффект Ганна.

Уравнение для плотности электрического тока в полупроводниках.

Уравнение непрерывности. Уравнение Пуассона.

Электронно-дырочный (p-n) переход. Инжекция и экстракция неосновных носителей заряда. Вольт-амперная характеристика p-n перехода.

Токи носителей заряда в p-n переходе, квазиуровни Ферми. Генерация и рекомбинация носителей в p-n переходе. Барьерная и диффузионная емкость. Частотные и импульсные свойства. Пробой p-n перехода: тепловой, лавинный, туннельный.

Транзисторный эффект. Зонная диаграмма полупроводниковой структуры с двумя близко расположенными p-n переходами. Коэффициент инжекции. Коэффициент переноса носителей через базу. Коэффициент усиления транзистора.

Контакт металл-полупроводник. Теория Шоттки. Вольт-амперная характеристика. Омический контакт. Сопоставление с p-n переходом.

Структура металл-диэлектрик-полупроводник. Зонная диаграмма и ее изменение при приложении напряжения. Роль поверхностных состояний, подвижных и неподвижных зарядов в диэлектрике.

Гетероструктуры. Зонная диаграмма гетеро- p-n перехода.

Коэффициент инжекции. Суперинжекция. Одинарные и двойные гетероструктуры. Варизонные структуры.

Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Поглощение излучения: собственное и примесное, экситонное и на свободных носителях.

Закон Бугера. Красная граница поглощения. Фотопроводимость.

Спектральная характеристика. Фотовольтаический эффект в  $p-n$  переходе.

Эффекты, вызываемые поглощением высокоэнергетического ядерного излучения в полупроводниках.

Излучение полупроводников. Прямые и непрямые переходы носителей заряда. Виды люминесценции: инжекционная, катодо-, фото- люминесценция. Спектры излучения. Правило Стокса, антистоксова люминесценция. Квантовый выход. Вывод излучения из полупроводников.

Лазерный эффект в полупроводниках. Индуцированное (стимулированное) излучение. Оптический резонатор, усиление и генерация света. Пороговый ток.

Термоэлектрические явления. Термо- и гальваномагнитные эффекты.

Эффект Холла. Электро-, магнито-, акустооптические эффекты.

Поверхностные акустические волны. Акустоэлектронные волны.

### **Приборы твердотельной электроники и микроэлектроники**

Полупроводниковые диоды. Устройство и основные параметры. Выпрямительные и импульсные диоды. Варикапы. Стабилитроны и защитные диоды. Туннельные диоды. Диоды СВЧ: детекторные и смесительные, диоды Шоттки,  $pin$ -диоды, умножительные и параметрические, лавинно-пролетные, диоды Ганна. Полупроводниковые датчики ядерных излучений.

Полупроводниковые транзисторы. Биполярные транзисторы. Принцип действия, основные параметры, их зависимость от температуры. Частотные и импульсные характеристики. Диффузионно-дрейфовые транзисторы. Мощные транзисторы, в том числе СВЧ. Транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

Тиристоры и их разновидности. Основные параметры. Полевые транзисторы, принцип действия, основные параметры. Полевые транзисторы с  $p-n$  переходом, с барьером Шоттки. МДП-транзисторы с индуцированным и встроенным каналами  $p$ - и  $n$ -типов.

Шумы в транзисторах.

Полупроводниковые интегральные схемы. Транзисторы, диоды и другие элементы в интегральном исполнении. Межэлементная изоляция. ИС, БИС, СБИС. Классификация микросхем по конструктивно-технологическому принципу: МОП- и КМОП-ИС, биполярные (ТТЛ-, ЭСЛ-, И<sup>2</sup>Л-ИС); Би-КМОП; «кремний-на-изоляторе» («кремний-на-сапфире»)-ИС; GaAs-ИС на полевых транзисторах с барьером Шоттки (ПТШ).

Многослойные (объемные) ИС. Интеграция на пластине. Микросистемы (общее представление).

Микросхемотехника. Цифровые и аналоговые ИС. Базовые логические элементы: ТТЛ, ЭСЛ, МОП, КМОП, ПТШ. Микропроцессоры. Полупроводниковые ЗУ. Программируемые логические матрицы. Базовые матричные кристаллы. ЦАП – АЦП. Сигнальные микропроцессоры. ВИП и

стабилизаторы напряжения. Операционные усилители. Специфика интегральных СВЧ-устройств.

Оптоэлектроника. Фотоприемники: фото- резисторы, -диоды, -транзисторы, -матрицы. Основные параметры и характеристики. Фотоприемники ИК-диапазона, тепловизоры. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. Солнечные батареи: на монокристаллическом и аморфном кремнии, на поликристаллических пленках, с гетероструктурами.

Полупроводниковые лазеры (общее представление).

Светодиоды, параметры и характеристики. Суперяркие светодиоды. ИК-излучатели. Светодиодные дисплеи. Полимерные светодиоды (общее представление).

Оптроны и оптоэлектронные ИС.

Оптические дисковые и голографические ЗУ. Волоконнооптические линии связи. Элементы оптической вычислительной техники. Интегральная оптика.

Акустоэлектроника и акустооптика. Физические основы взаимодействия акустической волны с электронами твердого тела и взаимодействия оптических и акустических волн в твердых телах и жидкостях. Основные материалы акустоэлектроники и акустооптики и устройства на их основе для обработки аналоговых сигналов.

Магнитоэлектроника, криоэлектроника, твердотельные датчики (общее представление).

Газовые детекторы. Химические сенсоры на оксидных полупроводниках. Керамические и тонкопленочные сенсоры. Физика работы. Технология изготовления. Роль катализаторов. Стабильность и избирательность.

Химические сенсоры на основе кремниевых полевых транзисторов. Обработка сигнала сенсоров. Вопросы временной и температурной стабильности. Вопросы стандартизации. Конструкции сенсоров и вопросы корпусирования. Потребности и рынок. Перспективы развития. Интеллектуальные сенсорные устройства.

Краткий очерк истории твердотельных приборов и микроэлектроники. Даты важнейших открытий и изобретений. Ученые, внесшие вклад в развитие твердотельной микроэлектроники и примыкающих к ней областей.

### **Технология микроэлектроники и твердотельных приборов**

Планарная технология – общая схема техпроцесса. Групповая обработка. Минимальный топологический размер (МТР) – основной показатель уровня технологии. Степень интеграции ИС. Динамика МТР и степени интеграции, закон Мура. Перспективы развития планарной технологии. Гибридная технология. Микросборки и БИС на подложках.

Изготовление полупроводниковых пластин. Определение кристаллографической ориентации монокристаллов полупроводников. Ориентированная резка, шлифовка, полировка пластин.

Химическое травление и химическая полировка кремния и арсенида галлия. Химико-механическая полировка. Финишная очистка пластин. Методы контроля качества очистки.

Эпитаксия. Методы эпитаксиального выращивания кремния. Методы контроля качества эпитаксиальных слоев. Распределение примесей в эпитаксиальных слоях. Дефекты эпитаксиальных пленок. Получение эпитаксиальных гетеропереходов. Выращивание эпитаксиальных пленок  $A^3B^5$ . Оборудование для эпитаксиального выращивания пленок. Сравнение газотранспортной, жидкофазной, МОС-гидридной и молекулярной эпитаксии.

Создание диэлектрических покрытий на кремнии. Термодинамика процесса окисления кремния. Физическая модель процесса окисления кремния. Кинетика активного и пассивного окисления полупроводников. Структура окисла на кремнии. Перераспределение примеси при термическом окислении кремния. Формирование диэлектрических пленок методами осаждения из металлоорганических соединений.

Зарядовое состояние системы полупроводник—диэлектрик; факторы, влияющие на величину и знак заряда в системе. Связь параметров полупроводниковых приборов и ИС с зарядовым состоянием системы кремний—окисел.

Диффузия в полупроводниках. Физические основы процесса диффузии. Основные уравнения. Граничные условия и расчетные формулы для наиболее важных случаев диффузии. Методы проведения диффузионных процессов. Структурные схемы диффузионных печей. Особенности диффузии в соединения  $A^3B^5$ .

Электронно-ионная технология. Методы получения электронных и ионных пучков. Ионное легирование. Имплантация ионов. Плазмохимические и ионно-плазменные методы обработки полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев. Дефекты, вносимые электронно-ионной обработкой, их устранение. Конструктивные схемы ионных имплантеров и оборудования для электронно-ионной и ионно-химической обработки.

Металлизация. Получение тонких пленок термическим испарением в вакууме. Ионно-плазменное распыление. Химическое осаждение из газовой фазы. Оборудование для получения тонких пленок. Материалы тонкопленочной технологии.

Литография. Фотолитография. Основные типы оборудования для фотолитографии. Проекционная фотолитография, электроннолучевая литография и рентгенолитография. Фотошаблоны и их изготовление. Дефекты микросхем, связанные с фотолитографическими процессами.

Структуры элементов полупроводниковых ИС. Методы изоляции элементов. Технология структур «кремний на изоляторе». Структура и свойства элементов ИС.

Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Корпуса полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Методы герметизации. Бескорпусные приборы. Методы отвода тепла в мощных полупроводниковых приборах.

#### *4. Моделирование, испытания, надежность приборов твердотельной электроники, радиоэлектроники и изделий микро- и наноэлектроники*

Моделирование как основа проектирования приборов твердотельной, микро- и наноэлектроники. Методики построения физических и математических моделей. Двух- и трехмерное моделирование. Примеры моделей транзисторов, элементов микросхем. Системы моделирования и автоматизированного проектирования (общее представление).

Испытание изделий на устойчивость к воздействию внешних факторов: механических, климатических, радиационных, Виды испытаний: приемосдаточные, периодические, квалификационные. Особенности поведения полупроводниковых приборов и микросхем при различных видах радиационных и космических воздействий. Методы повышения радиационной стойкости приборов.

Основные положения, понятия и определения современной теории надежности. Статистические методы оценки и прогнозирования показателей надежности и долговечности. Физика причин отказов полупроводниковых приборов и микросхем. Катастрофические (внезапные) и деградационные (постепенные) отказы. Методы выявления потенциально ненадежных приборов и микросхем. Ускоренные испытания и имитационные методы испытаний.

#### **Радиоэлектронные компоненты**

Физические явления, определяющие электропроводность толсто пленочных резистивных материалов.

Толсто пленочные резисторы.

Основные типы постоянных и переменных резисторов.

Физические явления, определяющие емкостные свойства конденсаторов.

Типы, параметры и конструкции конденсаторов постоянной и переменной емкости.

Физические основы работы линий задержек на поверхностных акустических волнах.

Полупроводниковые термо- и фототранзисторы, позисторы, варисторы, болометры (общее представление)

#### **Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах, специфические приборы наноэлектроники и методы их изготовления, основные принципы создания приборов на квантовых эффектах**

Размерное квантование в гетероструктурах. Примеры структур с размерно-квантованным энергетическим спектром: квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки. Сверхрешетки. Туннелирование на одиночном барьере. Двухбарьерная структура. Резонансно-туннельные диод и транзистор. Эффект Джозефсона.

Транспортные явления в малоразмерных полупроводниковых структурах. Модулированное легирование. Полевые транзисторы с высокой



подвижностью электронов (НЕМТ). Гетеропереходный биполярный транзистор.

Квантовый эффект Холла. Энергетический спектр носителей заряда в магнитном поле. Квантование холловского сопротивления двумерного электронного газа в магнитном поле. Дробный квантовый эффект Холла.

Одноэлектроника. Квантование кулоновской энергии в мезоскопических системах. Явление кулоновской блокады при туннелировании через переходы с малой емкостью. Одноэлектронные транзисторы и схемы на их основе.

Представления об элементной базе квантовых компьютерах – кубитах. Свойства кубита. Управление эволюцией кубита. Элементарные однокубитовые и двухкубитовые операции как основа квантовых вычислений. Представление о принципах квантовой связи на одиночных фотонах.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Какие существуют типы химических связей?
2. Сравните энергетические диаграммы основных монокристаллических материалов микроэлектроники: Si, GaAs и др. Какие свойства материалов основаны на этой диаграмме?
3. Что такое зонная теория твердого тела? На чем она основывается?
4. Поясните энергетические спектры электронов в металлах, полупроводниках, диэлектриках.
5. Нарисуйте зонную диаграмму полупроводника. Отметьте зону проводимости и валентную зону.
6. Что такое «эффективная масса электрона»? Почему эффективная масса может «менять знак»?
7. Что такое собственные и примесные полупроводники? Донорные и акцепторные примеси?
8. Напишите функцию распределения Ферми-Дирака. Нарисуйте график зависимости от энергии. Как изменится график при увеличении температуры?
9. Как графически определить концентрацию носителей заряда в вырожденном полупроводнике?
10. Поясните зависимость концентрации электронов и дырок в зонах и их температурные зависимости.
11. Напишите функцию распределения Максвелла-Больцмана. Как графически определить концентрацию носителей заряда в невырожденном полупроводнике?
12. Что означает термин «рекомбинация носителей заряда»? Поясните явление рекомбинации «зона-зона» и рекомбинации через примеси и дефекты.
13. Поясните теорию рекомбинации Шокли-Рида.
14. Поясните термины: диффузионная длина, время жизни носителей, поверхностная рекомбинация.

15. Что такое электропроводность полупроводников? Чем температурная зависимость электропроводности полупроводников отличается от температурная зависимость электропроводности металлов?
16. Поясните поведение носители заряда в слабом электрическом поле.
17. Как электроны взаимодействуют с фононами, примесными атомами, дефектами?
18. Что такое подвижность электронов и дырок? Какова размерность этих величин?
19. Сформулируйте условие электронейтральности.
20. Что такое диффузия и дрейф носителей заряда? Напишите соотношение Эйнштейна.
21. Запишите уравнение для плотности электрического тока в полупроводниках.
22. Запишите уравнение непрерывности и поясните его.
23. Запишите уравнение Пуассона и поясните его.
24. Поясните процесс формирования электронно-дырочного *pn*-перехода. Что такое инжекция и экстракция неосновных носителей заряда?
25. Напишите формулу для вольт-амперной характеристики *pn*-перехода. Поясните, чем определяются токи носителей заряда в *pn*-переходе.
26. Нарисуйте энергетические диаграммы *pn*-перехода при нулевом, прямом и обратном смещениях. Поясните, что такое квазиуровни Ферми? Что они показывают?
27. Что такое контактная разность потенциалов? Как она зависит от материала и температуры?
28. Поясните процессы генерации и рекомбинации носителей заряда в *pn*-переходе. Как эти процессы влияют на вид вольт-амперной характеристики *pn*-перехода?
29. Что такое барьерная и диффузионная емкость *pn*-перехода?
30. Чем вольт-амперная характеристика *pn*-перехода отличается от вольт-амперной характеристики реального диода?
31. Что такое «транзисторный эффект»?
32. Нарисуйте зонную диаграмму полупроводниковой структуры с двумя близко расположенными *pn*-переходами при термо-динамическом равновесии, при нормальном усилительном режиме включения, при инверсном включении.
33. Что такое коэффициент инжекции? Коэффициент переноса носителей через базу? Коэффициент усиления транзистора? Как их повысить? Как они зависят от тока эмиттера? Напряжения на коллекторном переходе?
34. Полупроводниковые транзисторы. Сформулируйте принцип действия, основные параметры, их зависимость от температуры. Поясните их частотные и импульсные характеристики.
35. Что такое мощные транзисторы, в том числе СВЧ. Их отличительные свойства, частотные характеристики.

36. Поясните принцип работы и вольт-амперные характеристики транзистора с изолированным затвором (IGBT).

37. Поясните принцип работы и вольт-амперные характеристики тиристоры и их разновидности.

38. Контакт металл-полупроводник. Поясните энергетические диаграммы, теория Шоттки и вольт-амперную характеристику этого контакта.

39. Поясните принцип работы и вольт-амперные характеристики полевых транзисторов.

40. Поясните энергетические диаграммы структур металл-диэлектрик-полупроводник и их изменения при приложении напряжения.

41. Поясните структуру и принцип действия МДП-транзисторов с индуцированным и встроенным каналами *p*- и *n*-типов. В чем заключаются особенности конструкции и технологии современных транзисторов?

42. Поясните зарядовые состояния системы полупроводник-диэлектрик; факторы, влияющие на величину и знак заряда в системе.

43. Гетероструктуры. Одинарные и двойные гетероструктуры. Нарисуйте зонную диаграмму гетеро-*pn*-перехода. Что такое «правило Андерсона»? Поясните, в чем отличие коэффициента инжекции гетероперехода от обычного *pn*-перехода?

44. Что такое суперинжекция? Поясните на энергетической диаграмме ее особенности.

45. Поясните принцип работы полупроводниковых лазеров (общее представление).

46. Какие фотоэлектрические явления в полупроводниках Вы знаете? Поясните на энергетической диаграмме.

47. Что такое излучение полупроводников?

48. Поясните принцип работы и спектр излучения светодиодов, их параметры и характеристики.

49. В чем заключается лазерный эффект в полупроводниках? В чем преимущества и недостатки полупроводниковых лазеров?

50. Какие приборы на основе наноструктур Вы знаете?

51. Что такое размерное квантование в гетероструктурах? Приведите примеры структур с размерно-квантованным энергетическим спектром: квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки. Сверхрешетки. Нарисуйте и поясните их энергетические диаграммы, вид волновых функций, вероятность обнаружения частицы в той или иной области.

52. Каковы перспективы развития планарной технологии?

53. Поясните методы эпитаксиального выращивания кремния.

54. Поясните физические основы процесса диффузии. Основные уравнения диффузии. В чем заключаются основные недостатки этого процесса?

55. Электронно-ионная технология. Поясните методы получения электронных и ионных пучков. Что такое ионное легирование?

56. Поясните суть метода молекулярно-лучевой эпитаксии, газофазной эпитаксии.

57. Литография. Фотолитография. Проекционная фотолитография, электроннолучевая литография и рентгенолитография. Сформулируйте их особенности.

58. Моделирование как основа проектирования приборов твердотельной, микро- и нанoeлектроники.

59. Поясните физические явления, определяющие электропроводность толсто пленочных резистивных материалов.

60. Поясните суть работы полупроводниковых термо- и фототранзисторов, позисторы, варисторов, болометров (общее представление).

61. Что является выходными параметрами сенсоров?

62. Как обеспечить временную стабильность характеристик сенсоров? Каковы физические ограничения этой стабильности?

63. Поясните принципы работы химических сенсоров на оксидных полупроводниках, преимущества и недостатки полупроводниковых газовых сенсоров.

64. Поясните селективность полупроводниковых газовых сенсоров.

65. Поясните суть туннелирования электронов на одиночном барьере: вид волновой функции, вероятность туннелирования.

66. Поясните суть преодоления электроном двухбарьерных структур.

67. Поясните суть работы резонансно-туннельных диодов и транзисторов.

68. Сформулируйте и поясните эффект Джозефсона.

69. Поясните транспортные явления в малоразмерных полупроводниковых структурах; модулированное легирование.

70. Поясните принцип работы полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT).

71. В чем заключается квантовый эффект Холла? Дробный квантовый эффект Холла?

72. В чем заключается явление кулоновской блокады при туннелировании через переходы с малой емкостью. Поясните работу одноэлектронных транзисторов и схем на их основе.

73. Поясните представления об элементной базе квантовых компьютеров – кубитах.

### **Вопросы, включенные в билеты для проведения экзамена:**

1. Уравнение Шредингера. Волновая функция и ее свойства. Волновой вектор. Волновая функция для свободной частицы. Закон дисперсии для свободной частицы. Квантование энергии атома в потенциальной яме. Квантовые числа.
2. Уравнение электронейтральности. Расчет положения уровня Ферми и концентрации электронов в собственном полупроводнике. Закон действующих масс. Зависимость собственной концентрации от обратной температуры.

3. Приближение сильной связи в трехмерных кристаллах. Распределение плотности вероятности обнаружения  $e$ -нов от расстояния. Энергия возмущения. Обменный интеграл. Энергетические зоны. Закон дисперсии для твердого тела. Фактор вырождения.
4. Приближение слабой связи (почти свободных электронов). Модель Кронига-Пенни. Волновая функция. Прозрачность барьера. Закон дисперсии  $E(k)$ . Бегущие и стоячие волны. Схема приведенных зон.
5. Зависимость эффективной массы от  $k(p)$ . Изоэнергетические поверхности. Физический смысл эффективной массы. Компоненты тензора обратной эффективной массы  $e$ -на в кристалле. Закон дисперсии и понятие легких и тяжелых дырок. Приближение эффективной массы.
6. Граничные условия Кармана-Борна. Квантование волновой функции и энергетических состояний. Число состояний в энергетической зоне.
7. Зонная структура  $Si$ , параметры зонной структуры, определяющие возможность и эффективность использования данного полупроводника для конкретных практических приложений.
8. Закон дисперсии для твердого тела. Зависимость энергии электрона от квазиволнового вектора у дна и потолка энергетической зоны. Понятие дырки. Зависимость эффективной массы от  $k(p)$ .
9. Собственные и легированные полупроводники. Типы и роль примесей в полупроводниках. Уравнение электронейтральности.
10. Положение уровня Ферми и концентрация электронов в донорном полупроводнике в невырожденном случае в зависимости от температуры. Определение концентрации неосновных носителей заряда.
11. Основные пути развития кремниевой элементной базы. Физические ограничения. Закон Мура.
12. Транзисторный эффект. Зонная диаграмма полупроводниковой структуры с двумя близко расположенными  $p$ - $n$  переходами. Коэффициент инжекции. Коэффициент переноса носителей через базу. Коэффициент усиления транзистора.
13. Структура металл-диэлектрик-полупроводник. Зонная диаграмма и ее изменение при приложении напряжения. Роль поверхностных состояний, подвижных и неподвижных зарядов в диэлектрике.
14. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов. Определение оптической ширины запрещенной зоны по зависимости спектрального коэффициента поглощения.
15. Основные параметры и характеристики фотоприемников. Принцип работы фотодиода. Спектральные и частотные характеристики фотодиода.
16. Электронная микроскопия. История создания. Принцип действия. Физические ограничения.
17. Сканирующая атомно-силовая микроскопия. История создания. Принцип действия. Физические ограничения.

18. Методы определения элементного состава. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФС). Открытие и сущность метода. Ограничения метода.
19. Квантовые ямы. Энергетический спектр квантово-размерной структуры. Волновые функции частицы в потенциальной яме. Плотность вероятности нахождения частицы для различных квантовых состояний.
20. Плотность квантовых состояний. Трехмерный случай. Двумерный случай. Одномерный случай.
21. Классический эффект Холла. Целочисленный квантовый эффект Холла. Дробный квантовый эффект Холла.
22. Резонансно-туннельные диоды и транзисторы. Вольт-амперная характеристика РТД.

## **ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Промежуточная аттестация проводится в форме экзамена.

### **Требования и критерии оценивания ответов экзамена**

В процессе экзамена оценивается уровень научно-исследовательской компетентности аспиранта, что проявляется в квалифицированном представлении результатов обучения.

При определении оценки учитывается грамотность представленных ответов, стиль изложения и общее оформление, способность ответить на поставленный вопрос по существу.

Критерии выставления оценки на экзамене:

Оценка «ОТЛИЧНО» выставляется аспиранту, который показал при ответе на вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, что владеет материалом изученной дисциплины, свободно применяет свои знания для объяснения различных явлений и решения задач.

Оценка «ХОРОШО» выставляется аспиранту, в основном правильно ответившему на вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, но допустившему при этом непринципиальные ошибки.

Оценка «УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО» выставляется аспиранту, который в ответах на вопросы экзаменационного билета допустил существенные и даже грубые ошибки, но затем исправил их сам

Оценка «НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО» выставляется аспиранту, который:

- а) не ответил на вопросы экзаменационного билета
- б) при ответе на дополнительные вопросы обнаружил незнание большого раздела экзаменационной программы.

## **УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Основная литература:**

1. Шалимова К.В. /Физика полупроводников. СПб.: изд-во Лань. 2010. 384 с. ISBN 978-5-8114-09228-8.
2. Воронков, Э.Н. Твердотельная электроника: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений/[Э.Н. Воронков, А.М. Гуляев, И.Н. Мирошникова, Н.А. Чарыков]. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 320 с. ISBN 978-5-7695-4618-1.
3. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников изд. СПб. : изд-во Лань., 2008., 615 с. ISBN 978-5-8114-0762-0.
4. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. – М.: Наука, 2006. – 490 с.
5. Гуртов В.А. Твердотельная электроника : учеб. пособие / В. А. Гуртов. - 3-е изд., доп. - М. : Техносфера, 2008. - 512 с. - ISBN 978-5-94836187-1:
6. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учебное пособие для вузов по направлению 210100 "Электроника и микроэлектроника" / В. И. Старосельский . – М. : Юрайт, 2011 . – 463 с. – (Основы наук) . - ISBN 978-5-9916-0808-4 . .
7. Коледов Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок –СПб, изд-во «Лань», 2008. ISBN 978-5-8114-0766-8.
8. Винтайкин Б.Е. Физика твердого тела Серия: Физика в техническом университете. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008 г. 360 с. ISBN 978-5-7038-2459-72008
9. Коваленко А.А. Основы микроэлектроники. – М.: ИЦ «Академия», 2008. ISBN 978-5-7695-7040-7.
10. Алешкин В.Я. Курс лекций «Современная физика полупроводников» Нижний Новгород. 2013. 132 с. ([http://www.pnn.unn.ru/UserFiles/lectures/Aleshkin\\_lectures.pdf](http://www.pnn.unn.ru/UserFiles/lectures/Aleshkin_lectures.pdf))

#### **Дополнительная литература:**

11. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 488 с. ISBN 978-5-9221- 0995-6.
12. Sze S.M., Kwok Kwok Ng. Physics of semiconductor devices. John Wiley and Sons, 2007 – 815 p.
1. SCOPUS (<http://www.scopus.com/>)
2. ISI Web of Knowledge (<http://www.isiknowledge.com/>)
3. Журнал Физика и техника полупроводников (<http://journals.ioffe.ru/ftp/>)

Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение: *(программное обеспечение, на которое кафедра или МЭИ имеет лицензию, а также свободно распространяемое программное обеспечение)*

Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

Университетская информационная система «РОССИЯ»  
<https://uisrussia.msu.ru>

Справочно-правовая система «Консультант+» <http://www.consultant-urist.ru>

Справочно-правовая система «Гарант» <http://www.garant.ru>

База данных Web of Science <https://apps.webofknowledge.com/>

База данных Scopus <https://www.scopus.com>

Портал открытых данных Российской Федерации <https://data.gov.ru>

База открытых данных Министерства труда и социальной защиты РФ  
<https://rosmintrud.ru/opendata>

База данных Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
<https://elibrary.ru/>

База данных профессиональных стандартов Министерства труда и социальной защиты РФ  
<http://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/>

Базы данных Министерства экономического развития РФ  
<http://www.economy.gov.ru>

База открытых данных Росфинмониторинга <http://www.fedsfm.ru/opendata>

Электронная база данных «Издательство Лань» <https://e.lanbook.com>

Федеральная государственная информационная система «Национальная электронная библиотека» <https://нэб.рф>

Национальный портал онлайн обучения «Открытое образование»  
<https://openedu.ru>

Электронная база данных "Polpred.com Обзор СМИ"  
<https://www.polpred.com>

Официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии <http://protect.gost.ru/>

Электронная библиотека МЭИ <https://ntb.mpei.ru/e-library/index.php>.

#### ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

Доцент кафедры электроники и  
наноэлектроники  
к.т. н.

А.Д. Баринов

Заведующий кафедрой электроники и наноэлектроники

д.т. н., профессор

И.Н. Мирошникова

Директор ИРЭ  
к.т.н., доцент

Р.С. Куликов