

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.»

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по науке и инновациям

И.Г. Остроумов

«26» июня 2024 г.

**ПРОГРАММА-МИНИМУМ
КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

2.2.2 «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых
устройств»
(физико-математические науки)

ВВЕДЕНИЕ

В данной программе затрагиваются в первую очередь физические и физико-химические основы твердотельной микро- и нанoeлектроники, физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах и основные принципы создания квантовых устройств. Ряд вопросов посвящен непосредственно примерам различных устройств микро- и нанoeлектроники (в том числе квантовых), а также некоторым технологическим процессам.

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

Кандидатский экзамен по специальности проводится в форме экзамена на основе билетов. В каждом экзаменационном билете 2 вопроса по основной программе и 1 вопрос по дополнительной программе. Дополнительная программа утверждается на заседании кафедры «Электронные приборы и устройства» Института электронной техники и приборостроения для каждого аспиранта персонально со списком вопросов по теме диссертационного исследования аспиранта. Подготовка к ответу составляет 2 академических часа (90 минут) без перерыва с момента раздачи билетов. Ответы аспиранта оцениваются членами комиссии по пятибалльной системе в зависимости от полноты и правильности изложения вопросов. Итоговая оценка выставляется соответственно следующим критериям оценивания:

Отлично (5 баллов). Сдающий кандидатский экзамен продемонстрировал всестороннее, систематическое и глубокое знание материала, умение свободно выполнять задания, усвоил основную литературу, а также взаимосвязь основных понятий программы в их значении для приобретаемой профессии, проявил творческие способности в их понимании, изложении и использовании. При ответе на вопросы дополнительной программы показал глубокое знание материала и умение искать и анализировать современную научную литературу по теме исследования.

Хорошо (4 балла). Сдающий кандидатский экзамен продемонстрировал полное знание вопросов, успешно выполнил предусмотренные тестовые

задания, показал систематический характер знаний по программе и способен к их самостоятельному пополнению и обновлению в ходе дальнейшей профессиональной деятельности. При ответе на вопросы дополнительной программы показал хорошее знание материала и умение искать и анализировать современную научную литературу по теме исследования.

Удовлетворительно (3 балла). Сдающий кандидатский экзамен продемонстрировал знание основ в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по профессии, справился с выполнением тестовых заданий, знаком с основной литературой, рекомендованной данной программой, допустил погрешности в ответе на экзамене и при выполнении экзаменационных заданий, но обладает необходимыми знаниями для их устранения под руководством преподавателя. При ответе на вопросы дополнительной программы показал поверхностное знание материала, неумение искать и анализировать современную научную литературу по теме исследования.

Неудовлетворительно (0-2 балла). Сдающий кандидатский экзамен выявил значительные пробелы в знаниях основ, допустил принципиальные ошибки и не способен продолжить обучение и профессиональную деятельность по приобретаемой профессии.

ВОПРОСЫ

1 Физические и физико-химические основы твердотельной микро- и нанoeлектроники

1. Классификация твердых тел по типам связей. Основы кристаллографии. Трансляционная и точечная симметрия кристаллов. Решетки Браве. Приближение почти свободных электронов. Метод сильной связи.
2. Идеальные и реальные кристаллы. Структура реальных кристаллов. Основные типы дефектов кристаллической структуры. Термодинамика дефектов кристаллической решетки. Точечные и протяженные дефекты. Политипизм и полиморфизм.

3. Зонная теория твердого тела. Энергетические спектры электронов в металлах, полупроводниках, диэлектриках. Зона проводимости и валентная зона. Электроны и дырки. Эффективная масса электрона.
4. Общие свойства полупроводников. Основные монокристаллические материалы микроэлектроники. Поликристаллические и аморфные полупроводники. Собственные и примесные полупроводники. Донорные и акцепторные примеси.
5. Классическая теория электропроводности металлов. Зонная структура металлов. Уровень Ферми. Термоэлектрические явления в металлах. Сверхпроводимость металлов. Основы микроскопической теории сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера. Куперовские пары. Энергетическая щель.
6. 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.
7. Классическая и квантовая теории колебания решетки. Фононы. Дисперсия фононов. Оптическое поглощение на колебаниях решетки. Оптические переходы с участием примесей. Собственное поглощение полупроводников. Прямые и не прямые оптические переходы. Экситоны в полупроводниках.
8. 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.
9. Уравнение для плотности электрического тока в полупроводниках. Уравнение непрерывности. Уравнение Пуассона.
10. Рекомбинация носителей заряда. Рекомбинация «зона-зона» и рекомбинация через примеси и дефекты. Теория рекомбинации Шокли-

Рида. Диффузионная длина и время жизни носителей. Поверхностная рекомбинация.

11. Электронно-дырочный (p-n) переход. Инжекция и экстракция неосновных носителей заряда. Вольтамперная 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.
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. Контакт металл-полупроводник. Теория Шоттки. Вольтамперная характеристика. Омический контакт. Сопоставление с p-n переходом.
14. Структура металл-диэлектрик-полупроводник. Зонная диаграмма и ее изменение при приложении напряжения. Роль поверхностных состояний, подвижных и неподвижных зарядов в диэлектрике.
15. Гетероструктуры. Зонная диаграмма гетеро- p-n-перехода. Коэффициент инжекции. Суперинжекция. Одинарные и двойные гетероструктуры. Варизонные структуры.
16. 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.
17. Излучение полупроводников. Прямые и непрямые переходы носителей заряда. Виды люминесценции: инжекционная, катодо-, фотолюминесценция. Спектры излучения. Правило Стокса, антистоксова люминесценция. Квантовый выход. Вывод излучения из полупроводников.
18. Лазерный эффект в полупроводниках. Индуцированное (стимулированное) излучение. Оптический резонатор, усиление и генерация света. Пороговый ток.

19. Термоэлектрические явления. Термо- и гальваномагнитные эффекты. Эффект Холла. Электро-, магнито-, акустооптические эффекты. Поверхностные акустические волны. Акустоэлектронные волны.
20. Диэлектрики. Поляризация диэлектриков. Диэлектрическая восприимчивость и проницаемость. Механизмы поляризации диэлектриков. Пробой твердых диэлектриков.
21. Сегнетоэлектрики. Доменная структура. Точка Кюри. Диэлектрический гистерезис. Потери в сегнетоэлектриках.
22. Магнитные материалы. Магнитный момент свободного атома. Диамагнетизм и парамагнетизм. Магнитное упорядочение. Ферромагнетизм. Обменное взаимодействие. Магнитные домены. Точка Кюри. Магнитный гистерезис. Ферромагнетики и их особенности.
23. Некристаллические материалы твердотельной электроники и микроэлектроники. Модельные представления некристаллических материалов с положительной и отрицательной корреляционными энергиями. Пиннинг уровня Ферми. Эффекты долговременной релаксации.
24. Основные принципы теории стеклообразования. Аморфные полупроводники.
25. Жидкие кристаллы как мезоморфная фаза. Их классификация по Фриделю. Полимеры. Полимерные цепи. Разветвленные полимеры. Блоксополимеры. Дендроны и дендримеры. Частично кристаллическое, стеклообразное, высокоэластичное и вязкотекучее состояние полимеров.
26. Перколяционная модель строения полимера. Персистентная длина. Переход клубок – глобула. Эффекты самосборки и иерархической самоорганизация.

2 Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах, основные принципы создания квантовых устройств

1. Квантово-механическое описание микрообъектов: волновая функция, ее физический смысл и математические свойства, уравнение Шредингера.

2. Операторы в квантовой теории: представление физических величин эрмитовыми операторами, их свойства, вычисление средних значений физических величин.
3. Оптические и безызлучательные переходы в квантовых системах. Спонтанное и вынужденное излучения. Постановка задачи о взаимодействии электромагнитного поля с веществом и основные выводы, свойства вынужденного излучения. Основные результаты ее решения.
4. Энергетические состояния и квантовые переходы в атомных системах. Оптические переходы в полупроводниках. Ширина и форма спектральных линий. Механизмы однородного и неоднородного уширения линий в газах и твердых телах.
5. Инверсия населенностей энергетических состояний. Коэффициент усиления лазерной среды. Принципы создания инверсной населенности. Насыщение, поглощение и усиление света.
6. Кинетические уравнения. Схемы работы лазеров. Взаимодействие различных типов колебаний. Самовозбуждение и насыщение усиления. Конкуренция мод, многомодовый режим. Нестационарная генерация. Модуляция добротности и синхронизация мод. Методы генерации сверхкоротких (фемтосекундных) импульсов света.
7. 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.
8. Транспортные явления в малоразмерных полупроводниковых структурах. Модулированное легирование. Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT). Гетеропереходный биполярный транзистор.
9. Квантовый эффект Холла. Энергетический спектр носителей заряда в магнитном поле. Квантование холловского сопротивления двумерного электронного газа в магнитном поле. Дробный квантовый эффект Холла.
10. Одноэлектроника. Квантование кулоновской энергии в мезоскопических системах. Явление кулоновской блокады при туннелировании через

переходы с малой емкостью. Однобарьерные структуры. Двухбарьерные структуры. Кулоновская лестница. Упругое и неупругое сотуннелирование.

11. Спин-зависимый транспорт носителей заряда. Физические основы гигантского магнитосопротивления и спин-зависимого транспорта. Перспективы спинтроники. Эффект гигантского магнитосопротивления в тонкопленочных структурах. Явление осциллирующего обменного взаимодействия. Спин-поляризованный транспорт электронов через слоистые структуры.
12. Представления об элементной базе квантовых компьютерах – кубитах. Свойства кубита. Управление эволюцией кубита. Элементарные одно-кубитовые и двух-кубитовые операции как основа квантовых вычислений. Представление о принципах квантовой связи на одиночных фотонах.

3 Основные устройства микро- и нанoeлектроники, в том числе квантовые

1. Основные типы диодов и их базовые характеристики и принципы работы. Стабилитроны и защитные диоды. Выпрямительные и импульсные диоды. Интегральные диоды. Варикапы.
2. Основные типы транзисторов и их базовые характеристики и принципы работы. Биполярные транзисторы. Полевые транзисторы. СВЧ-транзисторы. Диффузионно-дрейфовые транзисторы.
3. Полупроводниковые интегральные схемы. Методы изоляции элементов в полупроводниковых интегральных микросхемах: изоляция электронно-дырочным переходом, диэлектрическая и комбинированная изоляция. Активные элементы интегральных микросхем. Биполярные полупроводниковые структуры интегральных микросхем.
4. Пассивные элементы полупроводниковых интегральных микросхем. Диффузионные резисторы, пленочные резисторы для интегральных микросхем, изготовленных по совмещенной технологии.
5. Солнечные элементы на монокристаллическом, поликристаллическом, аморфном и нанокристаллическом кремнии. Солнечные элементы на гетероструктурах. Полимерные солнечные элементы.

6. Элементы акустоэлектроники. Пьезоэлектрический эффект. Объемные и поверхностные акустические волны. Пьезорезонаторы, акустоэлектрические усилители на поверхностных акустических волнах.
7. Основные радиоэлектронные компоненты. Пассивные и активные радиоэлектронные компоненты. Толстопленочные резисторы. Основные типы постоянных и переменных резисторов. Конденсаторы. Типы, параметры и конструкции конденсаторов постоянной и переменной емкости. Линии задержки на поверхностных акустических волнах.
8. Оптические резонаторы. Основные типы: плоские, конфокальные, сферические, кольцевые. Устойчивость резонаторов. Типы колебаний, собственные частоты, добротность оптических резонаторов.
9. Основные типы лазеров. Газовые лазеры. Твердотельные лазеры: устройство и принцип работы, сравнительные характеристики. Жидкостные лазеры. Полупроводниковые лазеры с электронной и оптической накачкой.

4 Технологические процессы микро- и нанoeлектроники

1. Планарная технология – общая схема техпроцесса. Групповая обработка. Минимальный топологический размер (МТР) – основной показатель уровня технологии. Закон Мура. Перспективы развития планарной технологии.
2. Химическое травление и химическая полировка кремния и арсенида галлия. Химико-механическая полировка. Финишная очистка пластин. Методы контроля качества очистки.
3. Эпитаксия. Методы эпитаксиального выращивания кремния. Методы контроля качества эпитаксиальных слоев. Распределение примесей в эпитаксиальных слоях. Дефекты эпитаксиальных пленок. Получение эпитаксиальных гетеропереходов.
4. 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.

5. Зарядовое состояние системы полупроводник-диэлектрик; факторы, влияющие на величину и знак заряда в системе. Связь параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем с зарядовым состоянием системы кремний-окисел.
6. 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.
7. Металлизация. Получение тонких пленок термическим испарением в вакууме. Ионно-плазменное распыление. Химическое осаждение из газовой фазы. Оборудование для получения тонких пленок. Материалы тонкопленочной технологии.
8. Литография. Фотолитография. Основные типы оборудования для фотолитографии. Проекционная фотолитография, электроннолучевая литография и рентгенолитография. Фотошаблоны и их изготовление. Дефекты микросхем, связанные с фотолитографическими процессами.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Нанотехнология. Физика, процессы, диагностика, приборы / Под ред. В. В. Лучинина, Ю. М. Таирова - Москва: Физматлит, 2006.
2. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. - Москва: Наука, 1977.
3. Шалимова, К.В. Физика полупроводников / К. В. Шалимова. - Москва: Энергоатомиздат, 1985.
4. Сорокин, В.С. Материалы и элементы электронной техники / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева; в 2-х томах, 2-ое издание. - Санкт-Петербург: Лань, 2016.

5. Наночастицы, наносистемы и их применение. Часть 1. Коллоидные квантовые точки / Под ред. В. А. Мошникова, О. А. Александровой. - Уфа: Аэтерна, 2015. - 236 с.
6. Наночастицы, наносистемы и их применение. Часть 2. Углеродные и родственные слоистые материалы для современной наноэлектроники / Под ред. В. А. Мошникова, О. А. Александровой. - Уфа: Аэтерна, 2016. - 330 с.
7. Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: учеб. пособие / В. А. Мошников, Ю. М. Спивак, П. А. Алексеев, Н. В. Пермяков. - Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. - 144 с.
8. Химические методы получения керамических и полимерных наноматериалов из жидкой фазы / Под ред. В. В. Лучинина, О. А. Шиловой // Серия. Физика и технология микро- и наносистем. - Санкт-Петербург, 2013. - 218 с.
9. Гареев, Г.З. Терагерцовые системы и технологии: обзор современного состояния / Г. З. Гареев, В. В. Лучинин - Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. - 228 с.
10. Физика и технология микро- и наносистем / Под ред. В. В. Лучинина. - Санкт-Петербург: Русская коллекция, 2011. - 240 с.
11. Технология материалов микроэлектроники: методы разделения и очистки: учеб. пособие / Д. Д. Авров, О. А. Александрова, А. О. Лебедев, Е. В. Мараева - Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. - 204 с.
12. Технология материалов микроэлектроники: от минерального сырья к монокристаллу: учеб. пособие / Д. Д. Авров, О. А. Александрова, А. О. Лебедев [и др.]. - Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. - 146 с.
13. Ормонт, Б.Ф. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников и диэлектриков / Б. Ф. Ормонт. - Москва: Высшая школа, 1982.
14. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин - Санкт-Петербург : Лань, 2021.

15. Пихтин, А.Н. Квантовая и оптическая электроника / А. Н. Пихтин. - Москва: Абрис, 2012. - 655 с.
16. Пичугин, И.Г. Технология полупроводниковых приборов / И. Г. Пичугин, Ю. М. Таиров. - Москва: Высшая школа, 1984.
17. Бобков, А.А. Материаловедение микро- и наносистем. Иерархические структуры / А. А. Бобков, И. Е. Кононова, В. А. Мошников: под ред. В. А. Мошникова. - Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. - 202 с.
18. Гареев, К.Г. Физические основы магнитных материалов / К. Г. Гареев, В. П. Мирошкин. - Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. - 408 с.
19. Таиров, Ю.М. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов / Ю. М. Таиров, В. Ф. Цветков - Санкт-Петербург: Лань, 2002.
20. Барыбин, А.А. Физико-технологические основы электроники / А. А. Барыбин, В. Г. Сидоров. - Санкт-Петербург: Лань, 2001. - 272 с.
21. Барченко, В. Т. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве / В. Т. Барченко, Ю. А. Быстров, Е. А. Колгин. - Санкт-Петербург: Лань, 2001. - 254 с.
22. Золь-гель технология микро- и нанокompозитов / В. А. Мошников, Ю. М. Таиров, Т. В. Хамова, О. А. Шилова. - Санкт-Петербург: Лань, 2021.
23. Панов, М.Ф. Физические основы интегральной оптики / М. Ф. Панов, А. В. Соломонов, Ю. В. Филатов. - Москва: Академия, 2010.
24. Борисенко, В.Е. Нанoeлектроника / В. Е. Борисенко, А. И. Воробьева, Е. А. Уткина. -Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2009. - 223 с.
25. Алексеев, Н.И. Электроника алмаза / Н. И. Алексеев, В. В. Лучинин. - Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. - 64 с.
26. Драгунов, В.П. Основы нанoeлектроники / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин. - Москва: Логос, 2006. - 496 с.

