

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол от" " _____ 2024 г. №

Рабочая программа дисциплины
Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств
(кандидатский экзамен)

Уровень высшего образования
Подготовка научных и научно-педагогических кадров

Программа аспирантуры
2.2.2 «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств»
Научная специальность
11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи

форма обучения
Очная

Нижний Новгород
2024 год

1. Место и цель дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств (кандидатский экзамен)» относится к числу *обязательных* дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 4 году обучения в 7 семестре.

Цель дисциплины – Целями освоения дисциплины являются: является формирование профессиональных знаний, умений и навыков в области твердотельной электроники, радиоэлектронных компонентов, микро- и нанoeлектроники, а также основы технологии и принципы работы приборов на базе полупроводниковых материалов.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Выпускник, освоивший программу, должен

Знать:

- методологию теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности.
- фундаментальные основы науки о современном состоянии в областях твердотельной электроники, радиокомпонентов, микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах.

Уметь:

- спланировать теоретические и экспериментальных исследования в области профессиональной деятельности.
- критически оценивать, анализировать, применять базовую информацию, современную научную, техническую и патентную литературу и пополнять научные знания в областях твердотельной электроники, радиокомпонентов, микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах.

Владеть:

- основными навыками критически оценивать, анализировать, применять базовую информацию, современную научную, техническую и патентную литературу и пополнять научные знания в областях твердотельной электроники, радиокомпонентов, микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах.

3. Структура и содержание дисциплины.

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего - 36 часов, из которых 2 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем, 32 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

Таблица 2

Структура дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					
		Контактная работа, часов					Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
Обзорная лекция	6	2	-	-	2	-	2
Физика полупроводников и полупроводниковых приборов	4	-	-	-	-	-	4
Приборы твердотельной электроники и микроэлектроники	4	-	-	-	-	-	4

Технология микроэлектроники и твердотельных приборов	4	-	-	-	-	-	4
Проектирование и технология электронной компонентной базы	6	-	-	-	-	-	6
Радиационная стойкость изделий электроники и наноэлектроники	6	-	-	-	-	-	6
Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах, специфические приборы наноэлектроники и методы их изготовления, основные принципы создания приборов на квантовых эффектах	6	-	-	-	-	-	6
Промежуточная аттестация:	экзамен						
Итого	36	2			2	4	32

Таблица 3

Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля *
1	Обзорная лекция	Порядок проведения экзамена, на что надо обратить внимание, ответы на вопросы.	Лекция	
2	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. Поверхностная рекомбинация.	Самостоятельная работа	Экзамен

		<p>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.</p> <p>Уравнение для плотности электрического тока в полупроводниках. Уравнение непрерывности. Уравнение Пуассона.</p> <p>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.</p> <p>Транзисторный эффект. Зонная диаграмма полупроводниковой структуры с двумя близко расположенными $p-n$ переходами. Коэффициент инжекции. Коэффициент переноса носителей через базу. Коэффициент усиления транзистора.</p> <p>Контакт металл-полупроводник. Теория Шоттки. Вольт-амперная характеристика. Омический контакт. Сопоставление с $p-n$ переходом.</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>Излучение полупроводников. Прямые и не прямые переходы носителей заряда. Виды люминесценции: инжекционная, катодо-, фото- люминесценция. Спектры излучения. Правило Стокса, антистоксова люминесценция. Квантовый выход. Вывод излучения из полупроводников.</p> <p>Лазерный эффект в полупроводниках. Индуцированное (стимулированное) излучение. Оптический резонатор, усиление и генерация света. Пороговый ток.</p>		
--	--	--	--	--

		Термоэлектрические явления. Термо- и гальваномагнитные эффекты. Эффект Холла. Электро-, магнито-, акустооптические эффекты. Поверхностные акустические волны. Акустоэлектронные волны.		
3	Приборы твердотельной электроники и микроэлектроники	<p>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. 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).</p> <p>Тиристоры и их разновидности. Основные параметры.</p> <p>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.</p> <p>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-, И²Л-ИС); Би-КМОП; «кремний-на-изоляторе» («кремний-на-сапфире»)-ИС; GaAs-ИС на полевых транзисторах с барьером Шоттки (ПТШ)</p> <p>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.</p> <p>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.</p>	Самостоятельная работа	Экзамен

		<p>Полупроводниковые лазеры (общее представление).</p> <p>Светодиоды, параметры и характеристики. Суперяркие светодиоды. ИК-излучатели. Светодиодные дисплеи. Полимерные светодиоды (общее представление).</p> <p>Оптроны и оптоэлектронные ИС.</p> <p>Оптические дисковые и голографические ЗУ. Волоконнооптические линии связи. Элементы оптической вычислительной техники. Интегральная оптика.</p> <p>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.</p> <p>Спинтроника, криоэлектроника, твердотельные датчики (общее представление).</p> <p>Краткий очерк истории твердотельных приборов и микроэлектроники. Даты важнейших открытий и изобретений. Ученые, внесшие вклад в развитие твердотельной микроэлектроники и примыкающих к ней областей.</p>		
4	Технология микроэлектроники и твердотельных приборов	<p>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.</p> <p>Изготовление полупроводниковых пластин. Определение кристаллографической ориентации монокристаллов полупроводников. Ориентированная резка, шлифовка, полировка пластин.</p> <p>Химическое травление и химическая полировка кремния и арсенида галлия. Химико-механическая полировка. Финишная очистка пластин. Методы контроля качества очистки.</p> <p>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.</p> <p>Создание диэлектрических покрытий на кремнии. Термодинамика процесса окисления кремния. Физическая модель процесса окисления кремния. Кинетика активного и пассивного окисления полупроводников. Структура окисла на кремнии.</p>	Самостоятельная работа	Экзамен

		<p>Перераспределение примеси при термическом окислении кремния. Формирование диэлектрических пленок методами осаждения из металлоорганических соединений.</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>Электронно-ионная технология. Методы получения электронных и ионных пучков. Ионное легирование. Имплантация ионов.</p> <p>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.</p> <p>Металлизация. Получение тонких пленок термическим испарением в вакууме. Ионно-плазменное распыление. Химическое осаждение из газовой фазы. Оборудование для получения тонких пленок. Материалы тонкопленочной технологии.</p> <p>Литография. Фотолитография. Основные типы оборудования для фотолитографии. Проекционная фотолитография, электроннолучевая литография и рентгенолитография. Фотошаблоны и их изготовление. Дефекты микросхем, связанные с фотолитографическими процессами.</p> <p>Структуры элементов полупроводниковых ИС. Методы изоляции элементов. Технология структур «кремний на изоляторе». Структура и свойства элементов ИС.</p> <p>Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Корпуса полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Методы герметизации. Бескорпусные приборы. Методы отвода тепла в мощных полупроводниковых приборах.</p>		
5	Проектирование и технология электронной компонентной базы	<p>Иерархия моделирования и проектирования микро- и наноструктур изделий электронной компонентной базы. Понятие сквозного проектирования изделий микроэлектроники на примере САПР «TCAD Sentaurus». Взаимосвязи процессов развития технологии и проектирования изделий микроэлектроники. Закон Мура. Физические и технологические ограничения технологии производства изделий микроэлектроники.</p>	Самостоятельная работа	Экзамен

		<p>Физико-технологическое проектирование ЭКБ. Моделирование основных этапов технологического процесса изготовления изделий микроэлектроники. Реализация моделирования технологических процессов в САПР «TCAD Sentaurus» (эпитаксия, ионная имплантация, диффузия, окисление). Моделирование процесса ионного легирования. Алгоритм TRIM/TRIS. Взаимодействие ионов с аморфной и кристаллической мишенью. Понятие диэлектрического формализма. Особенности моделирования диффузионных процессов, процессов эпитаксии и окисления.</p> <p>Схемотехническое проектирование ЭКБ. Методы описания линейного четырехполосника. Импульсная и амплитудно-частотная характеристики линейного четырехполосника. S-, Y-, Z-, H- и G-параметры четырехполосника. Особенности описания нелинейного четырехполосника. Эквивалентные схемы базовых полупроводниковых элементов: диода, биполярного транзистора, полевого транзистора. Функционально-логическое проектирование ЭКБ. Макромоделирование аналоговых интегральных схем. Проектирование СВЧ монолитных интегральных схем в программе Microwave Office. Комбинаторная логика. Базовые логические элементы: И, ИЛИ, НЕ. Последовательная логика. Триггеры, счетчики, ячейка статической памяти. Основы архитектуры микропроцессора.</p> <p>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.</p>		
6	Радиационная стойкость изделий электроники и наноэлектроники	<p>Введение. Применимость радиационно-стойких изделий микроэлектроники, основные понятия и термины. Внешние воздействующие факторы (ВВФ). Классификация ВВФ. Условия эксплуатации изделий электронной техники. Предъявление требований к изделиям электронной техники в части воздействия ВВФ.</p> <p>Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. Виды ионизирующего излучения. Ионизационные потери ядерных частиц. Дефектообразование. Ядерные реакции.</p> <p>Электронная аппаратура космического применения. Внешние воздействующие факторы космического пространства. Радиационные условия космического пространства. Основные радиационные эффекты в ЭКБ при воздействии факторов КП. Методы прогнозирования отказов и сбоев ЭКБ при воздействии радиации космического пространства.</p>	Самостоятельная работа	Экзамен

		Методы испытаний на стойкость к воздействию радиационных факторов и импульсную электрическую прочность. Цели и задачи испытаний. Методы испытаний ЭКБ на стойкость к импульсным РВ по объемным ионизационным (мощности дозы) эффектам, по ионизационным (дозовым) эффектам. Методы испытаний микросхем на РС по эффектам структурных повреждений, по локальным радиационным эффектам. Испытания микросхем на импульсную электрическую прочность.		
7	Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах, специфические приборы нанoeлектроники 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. Селективное 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 компьютеров – кубитах. Свойства кубита. Управление эволюцией кубита. Элементарные одно-кубитовые и двухкубитовые операции как основа квантовых вычислений. Представление о принципах квантовой связи на одиночных фотонах.	Самостоятельная работа	Экзамен

4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся предполагает изучение конспектов лекций, выделенных разделов основной литературы, а также дополнительной литературы, подготовку к промежуточной аттестации.

Для текущего контроля обучающимся предлагаются следующие вопросы:

1. 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. 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.

2. 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.

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.

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-, И²Л-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. ВПП и стабилизаторы напряжения. Операционные усилители. Специфика интегральных СВЧ-устройств.

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.

Спинтроника, криоэлектроника, твердотельные датчики (общее представление).

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

3. 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 соединениях 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. Проектирование и технология электронной компонентной базы

Иерархия моделирования и проектирования микро- и наноструктур изделий электронной компонентной базы. Понятие сквозного проектирования изделий микроэлектроники на примере САПР «TCAD Sentaurus». Взаимосвязи процессов развития технологии и проектирования изделий микроэлектроники. Закон Мура. Физические и технологические ограничения технологии производства изделий микроэлектроники.

Физико-технологическое проектирование ЭКБ. Моделирование основных этапов технологического процесса изготовления изделий микроэлектроники. Реализация моделирования технологических процессов в САПР «TCAD Sentaurus» (эпитаксия, ионная имплантация, диффузия, окисление). Моделирование процесса ионного легирования. Алгоритм TRIM/TRIS. Взаимодействие ионов с аморфной и кристаллической мишенью. Понятие диэлектрического формализма. Особенности моделирования диффузионных процессов, процессов эпитаксии и окисления.

Схемотехническое проектирование ЭКБ. Методы описания линейного четырехполюсника. Импульсная и амплитудно-частотная характеристики линейного четырехполюсника. S-, Y-, Z-, H- и G-параметры четырехполюсника. Особенности описания нелинейного четырехполюсника. Эквивалентные схемы базовых полупроводниковых элементов: диода, биполярного транзистора, полевого транзистора.

Функционально-логическое проектирование ЭКБ. Макромоделирование аналоговых интегральных схем. Проектирование СВЧ монолитных интегральных схем в программе Microwave Office. Комбинаторная логика. Базовые логические элементы: И, ИЛИ, НЕ. Последовательная логика. Триггеры, счетчики, ячейка статической памяти. Основы архитектуры микропроцессора.

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.

5. Радиационная стойкость изделий электроники и наноэлектроники

Введение. Применимость радиационно-стойких изделий микроэлектроники, основные понятия и термины. Внешние воздействующие факторы (ВВФ). Классификация ВВФ. Условия эксплуатации изделий электронной техники. Предъявление требований к изделиям электронной техники в части воздействия ВВФ.

Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. Виды ионизирующего излучения. Ионизационные потери ядерных частиц. Дефектообразование. Ядерные реакции.

Электронная аппаратура космического применения. Внешние воздействующие факторы космического пространства. Радиационные условия космического пространства. Основные радиационные эффекты в ЭКБ при воздействии факторов КП. Методы прогнозирования отказов и сбоев ЭКБ при воздействии радиации космического пространства.

Методы испытаний на стойкость к воздействию радиационных факторов и импульсную электрическую прочность. Цели и задачи испытаний. Методы испытаний ЭКБ на стойкость к импульсным РВ по объемным ионизационным (мощности дозы) эффектам, по ионизационным (дозовым) эффектам. Методы испытаний микросхем на РС по эффектам структурных повреждений, по локальным радиационным эффектам. Испытания микросхем на импульсную электрическую прочность.

6. 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. Селективное легирование. Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT). 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 одно-кубитовые и двухкубитовые операции как основа квантовых вычислений. Представление о принципах квантовой связи на одиночных фотонах.

5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине

5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине.

При выполнении всех работ учитываются следующие **основные критерии**:

- уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы, заданные членами комиссии);
- умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;
- качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая сжатости);
- способность устанавливать внутри- и межпредметные связи,
- оригинальность мышления, знакомство с дополнительной литературой и другие факторы.

Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме экзамена

Оценка *отлично* – исчерпывающее владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, твердое знание основных положений дисциплины, умение применять концептуальный аппарат при анализе актуальных проблем. Логически последовательные, содержательные, конкретные ответы на все вопросы.

Оценка *хорошо* – достаточно полные знания программного материала, правильное понимание сути вопросов, знание определений, умение формулировать тезисы и аргументы. Ответы последовательные и в целом правильные, хотя допускаются неточности, поверхностное знакомство с отдельными теориями и фактами, достаточно формальное отношение к рекомендованным для подготовки материалам.

Оценка *удовлетворительно* – фрагментарные знания, расплывчатые представления о предмете. Ответ содержит как правильные утверждения, так и ошибки, возможно, грубые. Испытуемый плохо ориентируется в учебном материале, не может устранить неточности в своем ответе даже после наводящих вопросов.

Оценка *неудовлетворительно* – отсутствие ответа хотя бы на один из основных вопросов, либо грубые ошибки в ответах, полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией.

5.2. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

1. 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..
2. 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.

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 2

1. 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.
2. 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).

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.

а) основная литература:

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977.
2. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергия, 1976.
3. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. М.: Высш. шк., 1986.
4. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн. М.: Мир, 1984.
5. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника / Под ред. Н.Д. Федорова. М.: Радио и связь, 1998.
6. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1990.
7. Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. М.: Радио и связь, 1998.
9. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы, материалы, приборы и их изготовление. М.: Мир, 1985.
10. Емельянов В.А. Быстродействующие цифровые КМОП БИС. Минск: Полифакт, 1998.
11. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. М.: Радио и связь, 1989.
12. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов / Под ред. В.И. Стафеева. М.: Радио и связь, 1985.
13. Носов Ю.Р., Шилин В.А. Основы физики приборов с зарядовой связью. М.: Наука, 1986.
14. Трищенко М.А. Фотоприемные устройства и ПЗС. М.: Радио и связь, 1992.
15. Технология СБИС. В 2 кн. / Под ред. С. Зи. М.: Мир, 1986.
16. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1983.
17. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров.

- М.: Радио и связь, 1987.
18. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. М.: Радио и связь, 1989.
 19. Валиев К.А. Физические основы субмикронной фотолитографии. М.: Наука, 1990.
 20. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. М.: Мир, 1985.
 21. Моделирование полупроводниковых приборов и технологических процессов / Под ред. Д. Миллера. М.: Радио и связь, 1989.
 22. Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. М.: Высшая школа, 1989.
 23. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы. М.: Мир, 1988.
 24. Козырь И.Я. Качество и надежность интегральных микросхем. М.: Высш. шк., 1987.
 25. Базовые матричные кристаллы и матричные БИС / В.Г. Домрачев, П.П. Мальцев, И.В. Новаченко, С.Н. Пономарев. М.: Энергоатомиздат, 1992.
 26. Алексенко А.Г., Шагурин И.И. Микросхемотехника. М.: Радио и связь, 1987.
 27. Рычина Т.А., Зеленский А.В. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы. М.: Радио и связь, 1989.
 28. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. М.: РХД, 2001.
 29. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы нанoeлектроники. Новосибирск: НГТУ, 2000.
 30. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. В.Н. Мордковича. М.: Мир, 1988.
 31. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. СПб: «Лань», 2002.
 32. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов. М.: Высш. шк., 1984.
 33. Зи С.М. Технология СБИС. Кн.1 – М.: Мир, 1986. – 404 с.
 34. Зи С.М. Технология СБИС. Кн.2 – М.: Мир, 1986. – 453 с.
 35. Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.
 36. Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. – М.: Радио и связь. – 2004.
 37. Анализ стойкости систем связи к воздействию излучений / Л.О. Мырова, В.Д. Попов, В.И. Верхотуров; Под. ред. К.И. Кукка. – М.: Радио и связь, 1993.
 38. Рикетс Л.У., Бриджес Дж. Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты/ Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1979.
 39. Агаханян Т.М., Аствацатурьян Е.Р., Скоробогатов П.К. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах / Под ред. Т.М. Агаханяна. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
 40. Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. – М.: Радио и связь, 1994. Вербицкий А.А., Ларионова О.Г. Личностный и компетентностный подходы в образовании. Проблемы интеграции М.: Логос, 2009. – Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=468261>.

б) дополнительная литература:

1. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.
2. Шкелев Е.И. Электронные цифровые системы и микропроцессоры. – Нижний Новгород: Издательство ННГУ, 2004. – 153 с.
3. Денисенко В.В. Точность и достоверность моделирования МОП-транзисторов СБИС // Микроэлектроника. 2009. Т.38, №4. С.302-308.
4. ГОСТ 15150-69. Группа Г08. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды//Machines, instruments and other industrial articles. Applications for different climatic regions. Categories, operating, storage and transportation conditions as to environment climatic factors influence. – Введ. 01.01.1971. – Изд.офиц. – М.: Изд-во стандартов, 2008.
5. Обеспечение качества военной продукции. Новое поколение нормативных документов / М. Критенко // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2000. – №4. – С.50-53.
6. Группен К. Детекторы элементарных частиц: Справочное издание/ Пер. с англ. – Новосибирск: "Сибирский хронограф", 1999.
7. Физические процессы в облученных полупроводниках / Под ред. Л.С.Смирнова. – Новосибирск: Наука, 1977.

8. Барашенков В.С. Сечения взаимодействия частиц и ядер с ядрами. – Дубна: ОИЯИ. 1993.
9. Калмыков, Н.Н. Галактические космические лучи / Н.Н. Калмыков, Г.В. Куликов, Т.М. Роганова // Модель космоса. Том 1: Науч.-информационное издание / М.И. Панасюк, Е.Е. Антонова, Л.Л. Лазутин, С.А. Красоткин. – М.: КДУ, 2007. – Гл.1.2. – С.62-95.
10. Кузнецов Н.В., Соловьев Г.Г. Радиационная стойкость кремния. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
11. Ionizing radiation affects in MOS devices and circuits / Ed. by T.P. Ma, P.V.Dressendorfer. – N.Y.: John Wiley and Sons, 1989.
12. Чумаков, А.И. Радиационные эффекты в интегральных схемах от отдельных ядерных частиц // Модель космоса. Том 2: Научно-информационное издание / Л.С. Новиков, Н.В. Милеев, Г.Г. Соловьев, В.Н. Черник. – М.: КДУ, 2007. – Гл.1.19. – С.494-518.
13. Физика ядерного взрыва: В 2-х т. Т 1. Развитие взрыва / МО РФ. ЦФТИ. - М.: Наука. Физматлит, 1997.
14. Alexander D.R. Transient Ionizing Radiation Effects in Devices and Circuits // IEEE Trans. – 2003. Vol. NS-50.
15. ГОСТ 16504-81. Группа Т00. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения // The state system of testing products. Product test and quality inspection. General terms and definitions. – Введ. 01.01.1982. – Изд.офиц. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000.
16. РД В 319.03.52-2004. Микросхемы интегральные и полупроводниковые приборы. Методы контроля радиационной стойкости на этапах разработки, производства и поставки. Общая методика лазерных имитационных испытаний в широком диапазоне уровней и длительностей импульсов специальных факторов, а также температуры среды. - М.: МО РФ, 2004.
17. Валиев К.А., Вьюрков В.В., Орликовский А.А. Кремниевая наноэлектроника: проблемы и перспективы // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. №6. С.7-22. Равен Дж. Компетентность в современном обществе: выявление, развитие и реализация /Пер. с англ. – М.: Когито-Центр, 2002.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ;
 - материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование;
 - лицензионное программное обеспечение: *Windows, Microsoft Office*;
 - обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.
- ресурсам.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122), Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Автор:

_____ Е.С. Демидов

Рецензент:

_____ Д.А. Павлов

Заведующий кафедрой

_____ Д.А. Павлов

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета от
_____ 2022 года, протокол № б/н