

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»
Институт электронных и информационных систем
Кафедра физики твердого тела и микроэлектроники

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЭИС

И.О.Фамилия
С.И.АМИНОВ
18 мая 2018 г.
число месяц

**ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ
КОМПОНЕНТЫ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРЫ НА
КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ**

Дисциплина (модуль) по направлению подготовки
11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи
Направленность: Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и
наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Рабочая программа

СОГЛАСОВАНО

Начальник УМУ

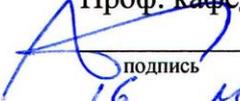

И.О.Фамилия
Г.Н.Чурсинова
16 05 2018 г.
число месяц

Начальник УАО

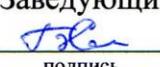

И.О.Фамилия
Н.Н.Максимюк
16 мая 2018 г.
число месяц

Разработал

Проф. кафедры ФТТМ


И.О.Фамилия
М.Н.Петров
16 мая 2018 г.
число месяц

Принято на заседании кафедры ФТТМ
Протокол № 8 от 16 мая 2018 г.
Заведующий кафедрой ФТТМ


И.О.Фамилия
Б.И.Селезнев
16 мая 2018 г.
число месяц

1 Цели и задачи дисциплины (модуля)

Рассматриваемый модуль является основным в подготовке аспирантов по профилю «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Целью изучения данного модуля аспирантами является подготовка кадров высшей квалификации в области твердотельной электроники, радиоэлектронных компонентов, микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах.

Задачами изучения модуля являются:

- исследование физических принципов и создание на их основе новых усовершенствованных традиционных приборов твердотельной электроники, радиоэлектронных компонентов, микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах;
- проектирование, расчет, моделирование и конструирование полупроводниковых приборов и элементов интегральных схем для создания интегральных структур с новыми функциональными и конструктивно-технологическими характеристиками;
- исследование и разработка методов и технологии изготовления приборов твердотельной электроники, радиоэлектронных компонентов, микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах;
- изучение структуры и определение состава полупроводниковых материалов и структур с применением рентгеновских лучей, оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, ионных пучков.

2 Место дисциплины (модуля) ОП направления подготовки

Дисциплина (модуль) **БК.В.1** «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» направлен на изучение модуля «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» и подготовку к сдаче кандидатского экзамена, входит в блок дисциплин **БП.В**. Изложение курса базируется на результатах изучения Программы вступительных испытаний при поступлении в аспирантуру по направлению 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи».

В результате изучения Программы вступительных испытаний при поступлении в аспирантуру по направлению 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи» и для изучения учебного модуля «Твердотельная электроника, радиоэлектроника, компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» обучающиеся должны:

знать:

- технологию создания твердотельных микро- и наноструктур;
- физические процессы, лежащие в основе функционирования базовых полупроводниковых структур;
- физические и математические модели приборов и устройств электроники и нанoeлектроники.

уметь:

- применять физические и математические модели для расчета характеристик микроструктур;
- выявлять доминирующие физико-химические факторы в технологическом цикле создания микроприборов;

владеть:

- современным математическим аппаратом, используемым для построения моделей приборов и устройств электроники и навыками расчета основных параметров и характеристик приборов твердотельной электроники.

Освоение данного модуля необходимо при изучении следующих учебных модулей:

- блок 2 «Практика»;
- блок 3 «Научно-исследовательская работа».

3 Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины направлен на освоение компетенций:

- УК-1 (универсальная компетенция) – способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях;
- ОПК-1 (общепрофессиональная компетенция) – владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности;
- ОПК-3 (общепрофессиональная компетенция) – способностью к разработке новых методов исследования и их применению в самостоятельной профессиональной научно-исследовательской деятельности в области профессиональной деятельности;
- ПК-1 (профессиональная компетенция) – способность учитывать современные тенденции развития электроники в своей профессиональной деятельности;
- ПК-4 (профессиональная компетенция) – способность использовать результаты исследований, знание закономерностей и тенденций развития электроники для совершенствования стратегии деятельности предприятий, НИИ и КБ радиоэлектронного комплекса.

В результате освоения дисциплины (модуля) аспирант должен знать, уметь и владеть:

| Шифр Индикатора достижения результата обучения (ИДРО) | Планируемые индикаторы достижения результата обучения (освоения компетенции) | Показатели достижения заданного уровня освоения компетенции | | | |
|---|---|---|---|--|--|
| | | Не достигнут (0-49%) Оценка: «Не удовлетворительно» | Достигнут на среднем уровне (50-59%) Оценка: «Удовлетворительно» | Достигнут на уровне выше среднего (60-89%) Оценка: «Хорошо» | Достигнут полностью (90-100%) Оценка: «Отлично» |
| УК-1 (31) | Знать: - методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при | Не знает | Знает основные понятия | Знает на достаточном уровне | Знает на высоком уровне |

| | | | | | |
|------------|---|------------|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| | решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях | | | | |
| УК-1 (У1) | Уметь: - анализировать альтернативные варианты решения исследовательских и конструкторско-технологических задач и оценивать потенциальные возможности реализации этих вариантов | Не умеет | В основном умеет | Умеет в достаточной мере | Умеет в полной мере |
| УК-1 (В1) | Владеть: - навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и конструкторско-технологических задач, в том числе междисциплинарных областях | Не владеет | Владеет основными навыками | Владеет навыками в достаточной мере | Владеет навыками в полной мере |
| ОПК-1 (З1) | Знать: - методологию теоретических и экспериментальных исследований в области электроники | Не знает | Знает основные понятия | Знает на достаточном уровне | Знает на высоком уровне |
| ОПК-1 (У1) | Уметь: - осуществлять выбор адекватных и эффективных методов теоретического и экспериментального исследования в области электроники | Не умеет | В основном умеет | Умеет в достаточной мере | Умеет в полной мере |
| ОПК-1 (В1) | Владеть: - навыками в использовании методов и средств теоретических и экспериментальных исследований в области электроники | Не владеет | Владеет основными навыками | Владеет навыками в достаточной мере | Владеет навыками в полной мере |
| ОПК-3 (З1) | Знать: - возможные способы разработки новых методов исследования и их применения в самостоятельной научно-исследовательской деятельности в области электроники | Не знает | Знает основные понятия | Знает на достаточном уровне | Знает на высоком уровне |
| ОПК-3 (У1) | Уметь: - применять известные научные результаты и методики для создания новых методов исследования и их применения в самостоятельной научно-исследовательской деятельности в области электроники | Не умеет | В основном умеет | Умеет в достаточной мере | Умеет в полной мере |
| ОПК-3 (В1) | Владеть: - навыками и практическим опытом использования измерительного, диагностического и технологического оборудования для проектной реализации новых методов исследования в самостоятельной научно-исследовательской деятельности в электронике. | Не владеет | Владеет основными навыками | Владеет навыками в достаточной мере | Владеет навыками в полной мере |

| | | | | | |
|-----------|---|------------|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| ПК-1 (32) | Знать: - проблемы и задачи, связанные с разработкой научных основ, физических и технических принципов создания и совершенствования приборов твердотельной электроники, микро- и нанoeлектроники, радиоэлектронных компонентов, приборов на квантовых эффектах | Не знает | Знает основные понятия | Знает на достаточном уровне | Знает на высоком уровне |
| ПК-1 (У2) | Уметь: - осуществлять отбор и критический анализ научно-технической и патентной информации в области твердотельной электроники и микроелектроники | Не умеет | В основном умеет | Умеет в достаточной мере | Умеет в полной мере |
| ПК-1 (В3) | Владеть: - навыками углубленного анализа перспективных твердотельных электронных приборов, радиоэлектронных компонентов, изделий микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах | Не владеет | Владеет основными навыками | Владеет навыками в достаточной мере | Владеет навыками в полной мере |
| ПК-4 (32) | Знать: - актуальные научные, технические и производственные проблемы в области твердотельной электроники, микро- и нанoeлектроники, радиоэлектронных компонентов, приборов на квантовых эффектах; | Не знает | Знает основные понятия | Знает на достаточном уровне | Знает на высоком уровне |
| ПК-4 (33) | - методы проектирования и технологию изготовления современной электронной компонентной базы; | | | | |
| ПК-4 (34) | - современные методы и средства моделирования приборов твердотельной электроники, микро- и нанoeлектроники, радиоэлектронных компонентов, приборов на квантовых эффектах; | | | | |
| ПК-4 (35) | - аналитическое и диагностическое оборудование, используемое в научных лабораториях и в условиях реального производства | | | | |
| ПК-4 (36) | - измерительное оборудование, используемое в научных лабораториях и в условиях реального производства. | | | | |

4 Структура и содержание дисциплины (модуля)

4.1 Трудоемкость дисциплины

В структуре УМ выделены учебные элементы дисциплины в качестве самостоятельных разделов.

Очная форма обучения

| Учебная работа (УР) | Распределение по семестрам |
|--|----------------------------|
| | 7 СЕМЕСТР |
| Трудоемкость в зачетных единицах (ЗЕТ) | 3 |
| Распределение трудоемкости по видам УР в академических часах (АЧ): | 108 |
| 1) <i>УЭМ1 Физика полупроводников и полупроводниковых приборов</i> | 18 |
| - лекции | 4 |
| - практические занятия | 2 |
| - внеаудиторная СРС | 12 |
| 2) <i>УЭМ2 Приборы твердотельной электроники и микроэлектроники</i> | 18 |
| - лекции | 4 |
| - практические занятия | 2 |
| - внеаудиторная СРС | 12 |
| 3) <i>УЭМ3 Технология микроэлектроники и твердотельных приборов</i> | 18 |
| - лекции | 4 |
| - практические занятия | 2 |
| - внеаудиторная СРС | 12 |
| 4) <i>УЭМ4 Моделирование, испытания, надежность приборов твердотельной электроники, радиоэлектроники и изделий микро- и наноэлектроники</i> | 18 |
| - лекции | 4 |
| - практические занятия | 2 |
| - внеаудиторная СРС | 12 |
| 5) <i>УЭМ5 Архитектура и элементная база систем на кристалле</i> | 18 |
| - лекции | 4 |
| - практические занятия | 2 |
| - внеаудиторная СРС | 12 |
| 6) <i>УЭМ6 Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах, специфические приборы нано-электроники и методы их изготовления, основные принципы создания приборов на квантовых эффектах</i> | 18 |
| - лекции | 4 |
| - практические занятия | 2 |
| - внеаудиторная СРС | 12 |
| Аттестация: | |
| - экзамены | Экзамен |

Трудоемкость дисциплины «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» (заочная форма обучения)

| Учебная работа (УР) | Распределение по семестрам |
|--|----------------------------|
| | 9 СЕМЕСТР |
| Трудоемкость «дисциплины» в зачетных единицах (ЗЕТ) | 3 |
| Распределение трудоемкости по видам УР в академических часах (АЧ): | 108 |
| 1) УЭМ1 Физика полупроводников и полупроводниковых приборов | 18 |
| - лекции | 2 |
| - практические занятия | 1 |
| - внеаудиторная СРС | 15 |
| 2) УЭМ2 Приборы твердотельной электроники и микроэлектроники | 18 |
| - лекции | 2 |
| - практические занятия | 1 |
| - внеаудиторная СРС | 15 |
| 3) УЭМ3 Технология микроэлектроники и твердотельных приборов | 18 |
| - лекции | 2 |
| - практические занятия | 2 |
| - внеаудиторная СРС | 14 |
| 4) УЭМ4 Моделирование, испытания, надежность приборов твердотельной электроники, радиоэлектроники и изделий микро- и нанoeлектроники | 18 |
| - лекции | 2 |
| - практические занятия | 1 |
| - внеаудиторная СРС | 15 |
| 5) УЭМ5 Архитектура и элементная база систем на кристалле | 18 |
| - лекции | 2 |
| - практические занятия | 1 |
| - внеаудиторная СРС | 15 |
| 6) УЭМ6 Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах, специфические приборы нанoeлектроники и методы их изготовления, основные принципы создания приборов на квантовых эффектах | 18 |
| - лекции | 2 |
| - практические занятия | 2 |
| - внеаудиторная СРС | 14 |
| Аттестация: | |
| - экзамены | Экзамен |

4.2 Содержание и структура разделов дисциплины

УЭМ1 Физика полупроводников и полупроводниковых приборов

1.1 Физика полупроводников

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.

1.2 Физика полупроводниковых приборов.

Электронно-дырочный (р-п) переход. Инжекция и экстракция неосновных носителей заряда. Вольт-амперная характеристика р-п перехода. Токи носителей заряда в р-п переходе, квазиуровни Ферми. Генерация и рекомбинация носителей заряда в р-п переходе. Барьерная и диффузионная емкость. Частотные и импульсные свойства. Пробой р-п перехода: тепловой, лавинный, туннельный.

Транзисторный эффект. Зонная диаграмма полупроводниковой структуры с двумя близко расположенными р-п переходами. Коэффициент инжекции. Коэффициент переноса носителей через базу. Коэффициент усиления транзистора. Контакт металл-полупроводник. Теория Шоттки. Вольт-амперная характеристика. Омический контакт. Сопоставление с р-п 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- р-п- 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 р-п 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 гальваномангнитные эффекты. Эффект Холла. Электро-, магнито-, акустооптические эффекты. Поверхностные акустические волны. Акустоэлектронные волны.

УЭМ2 Приборы твердотельной электроники и микроэлектроники

2.1 Приборы твердотельной электроники.

Полупроводниковые диоды. Устройство и основные параметры. Выпрямительные и импульсные диоды. Варикапы. Стабилитроны и защитные диоды. Туннельные диоды. Диоды СВЧ: детекторные и смесительные, диоды Шоттки, рiп – 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.

Полевые транзисторы, принцип действия, основные параметры. Полевые транзисторы с р-п переходом, с барьером Шоттки. МДП-транзисторы с индуцированным и встроенным каналами р- и п- типов.

Транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

Шумы в транзисторах.

Тиристоры и их разновидности. Основные параметры.

2.2 Компоненты, элементы и функциональные модули интегральной микроэлектроники.

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

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)

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.

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

2.3 Приборы функциональной электроники

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. Светодиоды источники освещения. 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).

УЭМ 3 Технология микроэлектроники и твердотельных приборов

3.1 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.

3.2 Базовые технологические процессы

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. 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».

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

УЭМ 4 Моделирование, испытания, надежность приборов твердотельной электроники, радиоэлектроники и изделий микро- и нанoeлектроники

4.1 Моделирование приборов твердотельной электроники

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

4.2 Испытания, надежность приборов твердотельной электроники, радиоэлектроники и изделий микро- и нанoeлектроники

Испытание изделий на устойчивость к воздействию внешних факторов: механических, климатических, радиационных, Виды испытаний: приемосдаточные, периодические, квалификационные. Особенность 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.

УЭМ 5 Архитектура и элементная база систем на кристалле

5.1 Основные функциональные блоки цифровых модулей систем-на-кристалле (СНК).

Краткая история развития СНК. Влияние СНК на электронную промышленность

Базовые функциональные модули цифровых СНК. Сдвиговые регистры. Сумматоры. Арифметико-логические устройства. Умножители. Память. Сенсоры изображения. ПЛИС. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Шины и сети. IP – модули.

Основной этап проектирования – системный, определяющий все основные характеристики разрабатываемого микроэлектронного устройства. Основа проектирования СНК – это методология разработки заказных микросхем на основе уже готовых сложно функциональных блоков (СФ- или IP-блоков). Подготовка спецификаций на требуемые СФ-блоки. Отбор готовых блоков. Приобретение или разработка недостающих блоков. Разработка и верификация моделей высокого уровня для используемых СФ-блоков.

Основные фирмы – разработчики IP- блоков

5.2 Особенности проектирования не цифровых модулей СНК

Маршрут проектирования аналоговых и радиочастотных блоков. Основные проблемы при проектировании аналоговых блоков: использование более дорогого модифицированного КМОП-техпроцесса; формирование высокоомных резисторов, конденсаторов со структурой металл – диэлектрик – металл (МДМ), индукторов, биполярных диодов, транзисторов с низкими токами утечки. Проблемы верификации аналоговых блоков. Проблема разброса параметров аналоговых блоков - основной фактор, определяющий соотношение «точность–быстродействие–потребляемая мощность». Необходимость выполнения статистического анализа моделей аналоговых IP-блоков.

УЭМ 6 Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах, специфические приборы наноэлектроники и методы их изготовления, основные принципы создания приборов на квантовых эффектах

6.1 Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах

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.

6.2 Специфические приборы наноэлектроники и методы их изготовления, основные принципы создания приборов на квантовых эффектах

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 двух-кубитовые операции как основа квантовых вычислений. Представление о принципах квантовой связи на одиночных фотонах.

Календарный план, наименование разделов дисциплины с указанием трудоемкости по видам учебной работы представлены в технологической карте дисциплины (приложение Б).

4.3 Организация изучения дисциплины

Методические рекомендации по организации изучения дисциплины «Твердотельная электроника, радиоэлектроника, компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» и достижения планируемых результатов обучения для достижения заданного уровня освоения компетенций с учетом использования в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения учебных занятий и электронной информационно-образовательной среды даются в Приложении А.

5 Контроль и оценка качества освоения дисциплины (модуля)

Контроль качества освоения аспирантами дисциплины «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» и его составляющих осуществляется непрерывно в течение всего периода обучения с использованием бально-рейтинговой системы (БРС), являющейся обязательной к использованию всеми структурными подразделениями университета.

Для оценки качества освоения дисциплины используются формы контроля: текущий – регулярно в течение всего семестра, промежуточная аттестация (семестровый контроль). Оценка качества освоения дисциплины осуществляется с использованием фонда оценочных средств, разработанного для данной дисциплины, по всем формам контроля.

Содержание видов контроля и их график отражены в технологической карте дисциплины «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» (Приложение Б).

6 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины представлено Картой учебно-методического обеспечения (Приложение В)

7 Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Лаборатория метрологии (2 часть) - 1328:

- Система позиционирования и контактирования для проведения параметрического анализа:
- зондовая станция EPS150Triax (на базе MPS150);
- Система для измерения параметров п/п приборов Keithley4200-SCS:
- Система установки и поддержания температуры AC-3:

- Компрессор Atlas Copco.

Учебно-научная лаборатория атомно-силовой микроскопии –1315:

- опто-электронная система морфологического анализа, в составе исследовательского модуля Наноэдьюкатор 11;
- опто-электронная система морфологического анализа, в составе исследовательского модуля Солвер Некст;
- спектрометр-ИК Фурье с приставками, приспособлениями и программным обеспечением;
- спектрофотометр V670 УФ-ВИД-БЛИК JASCO, оптическая система - двухлучевая схема; монохроматор;
- установка измерения эффекта Холла HMS5000-055T.

Лаборатория проектирования полупроводниковых приборов и интегральных схем - 1321:

- Учебная версия САПР Microwind для проектирования топологии КМОП интегральных схем;
- Учебные версии систем схемотехнического моделирования AIM-SPICE (AIM-Software) и PSPICE (Cadence Design Systems);
- Полнофункциональная бесплатная система схемотехнического моделирования LTSPICE (Linear Technology);
- Лицензионный приборно-технологическая САПР Synopsys TCAD Sentaurus, включающая набор функциональных модулей для моделирования и эмуляции технологического процесса (Sentaurus Process, TSUPREM-4 и Sentaurus Structure Editor), приборного моделирования (Sentaurus Device), визуализации результатов расчета (Sentaurus Inspect) и графическую оболочку (Sentaurus Workbench).
- Система визуального моделирования Simulink, входящая в пакет вычислительной математики MATLAB 9.
- САПР Quartus II фирмы Altera для синтеза и моделирования цифровых устройств.

Мультимедийная учебная лаборатория – 1313:

- мультимедийная система ПК IBM ATX Inwia S500;
 - монитор 17/КК/м;
 - мультимедийный проектор Epson EMP-X5;
 - подвесной экран;
 - лицензионная ОС Windows 7 Professional, объединенные в локальную сеть с выходом в Интернет.

Приложения (обязательные):

А – Методические рекомендации по организации изучения дисциплины

Б – Технологическая карта

В - Карта учебно-методического обеспечения дисциплины

Приложение А (обязательное)

Методические рекомендации по организации изучения дисциплины «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Целью занятий по дисциплине (модулю) «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» является формирование компетентности студентов в следующих областях:

- физики полупроводников и полупроводниковых приборов,
- технология микроэлектроники и твердотельных приборов,
- моделированию, испытанию, надежности приборов твердотельной электроники, радиоэлектроники и изделий микро- и нанoeлектроники,
- архитектуре и элементной базе систем на кристалле,
- современному состоянию специфических приборов нанoeлектроники и методы их изготовления,
- создания приборов на квантовых эффектах.

Задачами занятий являются:

- ознакомление с материаловедческими проблемами создания полупроводниковых приборов с нанометровыми топологическими нормами;
- изучение принципа действия и характеристик различных типов полупроводниковых приборов, определяющих современную элементную интегральных схем и систем на кристалле.
- изучение технологических особенностей изготовления современных приборов микро- и нанoeлектроники;
- получение практических навыков измерений характеристик микро и нано структур на современном диагностическом оборудовании.

Структура и содержание основных разделов представлены в приложении А1. Лекционная работа проводится с использованием мультимедийной аудитории с демонстрацией презентаций. Заслушиваются доклады по тематике рефератов.

Примерные темы рефератов:

- Функционально-интегрированные приборы на кремнии.
- Технология и конструктивные особенности FINFET транзистора.
- Проблемы повышения воспроизводимости параметров аналоговых блоков СНК при снижении топологических размеров.
- ПТШ на арсениде галлия.
- Гетероструктурные биполярные транзисторы на базе сплава Si-Ge.
- Технологические особенности изготовления СВЧ PIN-диодов на арсениде галлия.
- Реализация и параметры различных типов АЦП.
- Квантование аналогового сигнала по времени.
- Экстракция параметров компактной модели диода на p-n переходе из экспериментальных данных.
- Назначение и реализация процессоров на базе искусственного интеллекта в топовых смартфонах.
- Реализация и параметры различных типов ЦАП.

- Конструкции и технологии реализации Flash памяти.
- Реализация соединений между функциональными блоками системы на кристалле с помощью сетей.
- Технология изготовления транзисторов на основе гетеропереходов Si-Ge.
- Методы экстракции параметров компактной модели диода из экспериментальных данных.
- Транспортные явления в малоразмерных полупроводниковых структурах.
- Технологические методы реализации трехмерных ИС.

Требования к содержанию реферата:

В реферате должна быть указана цель работы, обоснована ее актуальность, проведен анализ литературных источников, в том числе периодической литературы, представлен материал по методикам анализа структур, принципам действия приборов и их характеристикам, технологическим особенностям изготовления приборных структур. В заключении представляются выводы по работе.

Практические занятия заключаются:

- В ознакомлении со сложным аналитическим оборудованием: зондовые измерения, атомно-силовая микроскопия, ИК Фурье спектроскопия, холловские измерения. Изучение описаний оборудования выносится на самостоятельную работу.
- В ознакомлении с используемым для проектирования СБИС и СНК программным обеспечением: САПР TCAD Sentaurus; семейства SPICE-подобных систем моделирования: студенческие версии AIM-SPICE и PSPICE, полнофункциональная версия CM LTSPICE; САПР Quartus, система визуального проектирования Simulink, САПР проектирования топологии MicroWind. Изучение описаний программных средств выносится на самостоятельную работу. На практических занятиях решаются задачи по изучению программных средств, применяемых на отдельных иерархических уровнях проектирования.
- Решению задач по расчету параметров микроэлектронных и наноэлектронных компонентов, экстракции параметров компактных моделей полупроводниковых приборов из экспериментальных данных и данных, полученных моделированием в САПР TCAD Sentaurus.

На практических занятиях решаются задачи и осуществляется тестовый контроль.

Пример:

Рассчитать пороговое напряжение n -канального МДП-транзистора V_{te} с поликремниевым затвором n^+ -типа, имеющего параметры:

- концентрация примеси в подложке $N_A = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$;
- концентрация примеси в поли кремнии $N_d (\text{поли}) = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$;
- толщина подзатворного диэлектрика (SiO_2) $t_{ox} = 0,07 \text{ мкм}$;
- подвижность электронов в канале $\mu_n = 600 \text{ см}^2/\text{В.с}$;
- плотность поверхностных состояний N_{ss} на границе Si-SiO₂ составляет 10^{11} см^{-2} ;
- напряжение подложка-исток равно нулю.

Решение

$$V_{Te}^{расч} = V_{Te ид} + V_{FB}$$

$$V_{Te ид} = V_{OX} + V_{Si}$$

$$V_{FB} = V_{SS} + V_{GB},$$

где:

V_{OX} – напряжение, падающее на подзатворном окисле, В;

V_{Si} – напряжение инверсии приповерхностной области кремния;

V_{SS} – компонента напряжения плоских зон V_{FB} вследствие не идеальности поверхности раздела Si-SiO₂ и несовершенства диэлектрика;

V_{GB} – компонента напряжения плоских зон V_{FB} , учитывающая разницу в работах выхода из материала подложки и материала затвора.

$$V_{Si} = -2 \cdot \varphi_F(\text{подл}) = -\varphi_T \cdot \ln(n_i/N_A) = -0.026 \cdot \ln(1.5 \cdot 10^{10} / 5 \cdot 10^{15}) = 0.66 \text{ В.}$$

$$V_{OX} = Q_{ОПЗ} / C_{OX} = 3.349 \cdot 10^{-8} / 4.931 \cdot 10^{-8} = 0.68 \text{ В,}$$

где:

$$C_{OX} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{OX} / t_{OX} = 4.931 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2, 4.931 \cdot 10^{-8}$$

$$Q_{ОПЗ} = (2q \cdot N_A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{OX} \cdot |\varphi_F(\text{подл})|)^{0.5} = 3.349 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2, 4.931 \cdot 10^{-8};$$

В итоге идеальная составляющая порогового напряжения равна:

$$V_{Te ид} = V_{OX} + V_{Si} = 0.66 + 0.68 = 1,34 \text{ В.}$$

Компоненты напряжения плоских зон:

$$V_{SS} = -Q_{SS} / C_{OX} = -q \cdot N_{SS} / C_{OX} = -0.446 \text{ В;}$$

$$V_{GB} = \varphi_F(\text{подл}) - \varphi_F(\text{затв}) = -0.88 \text{ В.}$$

В итоге напряжение плоских зон

$$V_{FB} = V_{SS} + V_{GB} = -0.446 - 0.88 = -1,326 \text{ В;}$$

Поровое напряжение МОП транзистора

$$V_{Te}^{расч} = V_{Te ид} + V_{FB} = 1,34 - 1,326 = 0,014 \text{ В.}$$

Вывод: Полученное значение порогового напряжения близко к нулю и поэтому требует коррекции.

Аудиторная и внеаудиторная самостоятельная работа аспирантов заключается в подготовке к практическим занятиям, написании рефератов, в подготовке к экзамену.

Вопросы для самостоятельной работы аспирантов:

- Особенности полупроводниковой наноэлектроники.
- Физические эффекты в приборах наноразмерной электроники.
- Моделирование как основа проектирования приборов твердотельной, микро- и наноэлектроники.

- Иерархия моделей полупроводниковых приборов.
- Основные технологические процессы в интегральной электронике и их модели.
- Моделирование переноса носителей. Кинетическое уравнение Больцмана. Модели механизмов рассеивания.
- Моделирование полупроводниковых приборов на основе сплава кремний-германий.
- Учет квантовых эффектов при моделировании наноразмерных транзисторных структур.
- Коррекция квантовых эффектов в полуклассическом приближении.
- Квантовый транспорт носителей в полупроводниковых структурах. Эффект туннелирования.
- Значение методов приборно-технологического моделирования для производства.

Вопросы к экзамену:

1. Приборы функциональной микроэлектроники на акустических волнах.
2. Оптоэлектронные приборы функциональной микроэлектроники.
3. Туннельные механизмы переноса заряда в барьерных структурах и твердых телах – термоактивационное туннелирование, резонансное туннелирование.
4. Чем отличается конструкция диода Шоттки от конструкции омического контакта?
5. Что такое удельное переходное сопротивление омического контакта?
6. В чем заключается основной недостаток алюминия в качестве контактного материала к кремнию?
7. Каковы основные проблемы многоуровневой металлизации СБИС?
8. В чем состоит преимущество диодов на основе выпрямляющего контакта металл-кремний перед диодом на основе p-n перехода?
9. Каково функциональное назначение диэлектрических слоев в многослойной системе металлизации?
10. Какие способы формирования пленок силицидов вы знаете?
11. Дефекты кристаллической структуры полупроводников.
12. Рентгенографические методы анализа структуры полупроводниковых кристаллов и аморфных материалов.
13. Исследование полупроводниковых структур методами растровой электронной микроскопии.
14. Что такое эффект влияния подложки и как он изменяет пороговое напряжение?
15. Законы масштабирования и энергопотребление.
16. Перечислите источники энергетических потерь в КМОП ИС.
17. Выбор метода изоляции КНИ ИС.
18. Сравните подложки на КНС и КНИ.
19. Метод формирования КНС-структуры.
20. Трехмерные ИС на основе КНИ структуры.

Пример экзаменационного билета

ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет
им. Ярослава Мудрого»

Кафедра физики твердого тела и микроэлектроники

Экзаменационный билет №

Дисциплина (модуль) «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Направление подготовки 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи

Направленность: Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

1. Приборы функциональной микроэлектроники на акустических волнах
2. Перечислите источники энергетических потерь в КМОП ИС.

Принято на заседании КФТТМ

«___» _____ г., протокол № _____

Зав. кафедрой ФТТМ

_____ Б.И.Селезнев

Таблица А.1 – Организация изучения дисциплины «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

| Раздел модуля | Технология и форма проведения занятий | Задания на СРС | Дополнительная литература и интернет-ресурсы |
|--|--|---|--|
| УЭМ1 Физика полупроводников и полупроводниковых приборов | | | |
| 1.1 Физика полупроводников | – опрос – информационная лекция – решение задач с обсуждением результатов | – изучение дополнительной литературы | 1 Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учеб. Пособие: для вузов/ В.И. Старосельский . – М.: Юрайт, 2011. – 463 с. 2. Зебрев Г.И. Физические основы кремниевой нанoeлектроники: Уч. пособие для вузов / Г.И.Зебрев. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 240 с. 3. Петров, М. Н. Моделирование компонентов и элементов интегральных схем: учеб. пособие для вузов / М. Н. Петров, Г.В.Гудков. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2011. – 462 с. |
| 1.2 Физика полупроводниковых приборов | – опрос – информационная лекция – решение задач с обсуждением результатов | – изучение дополнительной литературы | |
| УЭМ2 Приборы твердотельной электроники и микроэлектроники | | | |
| 2.1 Приборы твердотельной электроники | – обсуждение результатов рубежного контроля по УЭМ1 – информационная лекция – решение задач с обсуждением результатов – опрос | – подготовка к практическим занятиям; – решение задач – изучение дополнительной литературы – подготовка к опросу | 1. Ефимов И. Е. Основы микроэлектроники : учебник / И. Е. Ефимов, И. Я. Козырь. - 3-е изд., стер. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2008. - 383с. 2. Рабаи Жан М., Чандракасан Антанта, Николич Боривож. Цифровые интегральные схемы: Методология проектирования, 2-е издание.: Пер. с англ. – М.: ООО “И.Д. Вильямс”, 2007. – 912 с 3 Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. Изд. 2-е испр. – М.: Техносфера, 2011. – 800 с. 4 Цифровая схемотехника. Учеб. пособие. / Е.П. Угрюмов. |
| 2.2 Компоненты, элементы и функциональные модули интегральной микроэлектроники | – опрос – информационная лекция – проведение и защита лабораторных работ – проведение ПЗ | – решение задач – изучение дополнительной литературы – подготовка к опросу | |

| Раздел модуля | Технология и форма проведения занятий | Задания на СРС | Дополнительная литература и интернет-ресурсы |
|---|--|---|--|
| 2.3 Приборы функциональной электроники | <ul style="list-style-type: none"> – опрос – информационная лекция – проведение и защита лабораторных работ – решение задач с обсуждение результатов | <ul style="list-style-type: none"> – решение задач – изучение дополнительной литературы – подготовка к опросу – подготовка реферата | – 3-е изд. – СПб. : БХВ, 2010. – 816 с. |
| УЭМ 3 Технология микроэлектроники и твердотельных приборов | | | |
| 3.1 Планарная технология – общая схема техпроцесса | <ul style="list-style-type: none"> – опрос – информационная лекция | <ul style="list-style-type: none"> – изучение основной и дополнительной литературы – подготовка к опросу | <p>1 Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий: учебн. Пособие для вузов: в 2 т. Т. 1: Физико-химические основы технологии микроэлектроники / Ю.Д. Чистяков, Ю.П. Райнова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 292 с.</p> <p>2 Королев М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: Учеб. пособие: В 2-х ч. Ч. 1: Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование. / М.А.Королев, [и др.]; Под ред. Ю.А.Чаплыгина. – М.: Бином, Лаборатория знаний, 2007. – 397 с.</p> <p>3 Королев М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: Учеб. пособие: В 2-х ч. Ч. 2: Элементы и маршруты изготовления кремниевых ИС и методы их математического моделирования. / М.А.Королев, [и др.]; Под ред. Ю.А.Чаплыгина. М.: Бином, Лаборатория знаний, 2009. – 422 с.</p> |
| 3.2 Базовые технологические процессы | <ul style="list-style-type: none"> – опрос – информационная лекция – решение задач с обсуждение результатов | <ul style="list-style-type: none"> – изучение основной и дополнительной литературы – подготовка к опросу | |
| УЭМ 4 Моделирование, испытания, надежность приборов твердотельной электроники, радиоэлектроники и изделий микро- и нанoeлектроники | | | |
| 4.1 Моделирование приборов твердотельной электроники | <ul style="list-style-type: none"> – опрос – информационная лекция – проведение ПЗ | <ul style="list-style-type: none"> – изучение основной и дополнительной литературы – подготовка к опросу | 1 Петров, М. Н. Моделирование компонентов и элементов интегральных схем: учеб. пособие для вузов / М. Н. Петров, Г.В.Гудков. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2011. – |

| | | | |
|---|--|--|---|
| 4.2 Испытания, надежность приборов твердотельной электроники, радиоэлектроники и изделий микро- и нанoeлектроники | – опрос – информационная лекция – решение задач с обсуждение результатов | – изучение основной и дополнительной литературы – подготовка к опросу | 462 с. 2 Казеннов Г.Г. Основы проектирования интегральных схем и систем. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 295 с. 3 Анализ кристаллов интегральных схем / под общей ред. В.В. Лучинина: СПбГЭТУ. СПб, 2016. – 216 с. 4 Брайден Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2006, – 377 с. |
| УЭМ 5 Архитектура и элементная база систем-на-кристалле (СНК) | | | |
| 5.1 Основные функциональные блоки цифровых модулей СНК 5.2 Особенности проектирования не цифровых модулей СНК | – опрос – информационная лекция – проведение ПЗ | – изучение основной и дополнительной литературы – подготовка к опросу | 1 Немудров В., Мартин Г. Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие.– М.:Техносфера, 2004. – 316 с. 2 Березин В. В. и др. Твердотельная революция в телевидении: Телевизионные системы на основе приборов с зарядовой связью, систем на кристалле и видеосистем на кристалле / Под ред. А. А. Умбиталиева и А. К. Цыцулина.– М.: Радио и связь, 2006. – 312 с. 3 Адамов Ю. Ф. Проектирование систем на кристалле. – М.: 2005. – 112 с. |
| УЭМ 6 Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах, специфические приборы нанoeлектроники и методы их изготовления, основные принципы создания приборов на квантовых эффектах | | | |
| 6.1 Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах | – опрос – информационная лекция – проведение ПЗ | – изучение основной и дополнительной литературы – подготовка к опросу | 1 Борисенко В.Е. Нанoeлектроника: учеб. пособие для вузов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 223 с. 2 Брайден Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2006, – 377 с. |
| 6.2 Специфические приборы нанoeлектроники и методы их изготовления, основные принципы создания приборов на квантовых эффектах | – опрос – информационная лекция – решение задач с обсуждение результатов | – изучение основной и дополнительной литературы – подготовка к опросу | 3 Гриднев С. А. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах / Гриднев С. А. и др. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.— 352 с. 4 Васильев Р.Б., Дирин Д.Н. Квантовые точки: синтез, свойства, применение. – М: ФНМ, 2007. – 34 с. 5 Деффейс К. Удивительные наноструктуры [Электронный ресурс] / К. Деффейс, С. Деффейс ; пер. с англ. под ред. Л. Н. Патрикеева. 3-е изд. (эл.). – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 209 с. |

Приложение Б
(обязательное)

Технологическая карта

дисциплины «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

семестр 7, ЗЕТ 3, вид аттестации Экзамен, акад.часов 108, баллов рейтинга 150

| Номер и наименование раздела учебной дисциплины, КП/КР | Номер недели семестра | Трудоемкость, ак.час | | | | СРС | Форма текущего контроля успеv. (в соотв. с паспортом ФОС) | Шифры ИДРО | Максим. кол-во баллов рейтинга |
|--|-----------------------|--|-------------------------|------|--------------------------|--|--|--------------|--------------------------------|
| | | Контактная работа (аудиторные занятия) | | | | | | | |
| | | ЛЕК | ПЗ | АСРС | | | | | |
| <i>УЭМ 1 Физика полупроводников и полупроводниковых приборов</i> 1.1 Физика полупроводников 1.2 Физика полупроводниковых приборов | 1-3 | 4 2 2 | 2 1 1 | | 12 6 6 | тестовые задание по темам | УК-1, ПК-1(У2), ПК-4(32,33) | 10 | |
| <i>УЭМ 2 Приборы твердотельной электроники и микроэлектроники</i> 2.1 Приборы твердотельной электроники 2.2 Компоненты, элементы и функциональные модули интегральной микроэлектроники 2.3 Приборы функциональной электроники | 4-6 | 4 2 - 2 | 2 - 1 1 | | 12 4 4 4 | тестовые задание по темам | ОПК-1, ПК-1(32), ПК-4(33) УК-1, ОПК-3, ПК-1(32,В3) ПК-4(33,34) ОПК-1, ПК-1(У2), ПК-4 | 10 | |
| <i>УЭМ 3 Технология микроэлектроники и твердотельных приборов</i> 3.1 Планарная технология – общая схема техпроцесса 3.2 Базовые технологические процессы | 7-9 | 4 2 2 | 2 1 1 | | 12 6 6 | тестовые задание по темам реферат | УК-1, ПК-1, ПК-4(36) | 10 20 | |
| <i>УЭМ 4 Моделирование, испытания, надежность приборов твердотельной электроники, радиоэлектроники и изделий микро- и нанoeлектроники</i> 4.1 Моделирование приборов твердотельной электроники 4.2 Испытания, надежность приборов твердотельной электроники, радиоэлектроники и изделий микро- и нанoeлектроники | 10-12 | 4 2 2 | 2 1 1 | | 12 6 6 | тестовые задание по темам | УК-1, ОПК-3, ПК-4 (32,34,35) ОПК-1, ПК-1, ПК-4(В3) | 10 | |

| Номер и наименование раздела учебной дисциплины, КП/КР | Номер недели семестра | Трудоемкость, ак.час | | | | СРС | Форма текущего контроля успеваемости (в соотв. с паспортом ФОС) | Шифры ИДРО | Максим. кол-во баллов рейтинга |
|---|-----------------------|--|-----------|------|-----------|---------------------------|---|------------|--------------------------------|
| | | Контактная работа (аудиторные занятия) | | | | | | | |
| | | ЛЕК | ПЗ | АСРС | | | | | |
| <i>УЭМ 5 Архитектура и элементная база систем-на-кристалле (СНК)</i> 5.1 Основные функциональные блоки цифровых модулей СНК 5.2 Особенности проектирования не цифровых модулей СНК | 13-15 | 4 | 2 | | 12 | тестовые задания по темам | УК-1, ПК-4 | 10 | |
| | | 2 | 1 | | 6 | | | | |
| | | 2 | 1 | | 6 | | ОПК-3, ПК-1(32), ПК-4(33) | | |
| <i>УЭМ 6 Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах, специфические приборы нанoeлектроники и методы их изготовления, основные принципы создания приборов на квантовых эффектах</i> 6.1 Физические эффекты в малоразмерных твердотельных структурах 6.2 Специфические приборы нанoeлектроники и методы их изготовления, основные принципы создания приборов на квантовых эффектах | 16-18 | 4 | 2 | | 12 | тестовое задание по темам | УК-1, ОПК-1, ПК-1(У2), ПК-4(32,34) | 10 | |
| | | 2 | 1 | | 2 | | | | |
| | | 2 | 1 | | 2 | реферат | ОПК-3, ПК-1(32), ПК-1(В3), ПК-4 | | 20 |
| Промежуточная аттестация (семестровый контроль) | | | | | | Экзамен | УК-1, ОПК-1, ОПК-3, ПК-4 | 50 | |
| Итого: | 18 | 24 | 12 | | 72 | | | 150 | |

В соответствии с положениями «О балльно-рейтинговой системе обучения аспирантов и ординаторов по программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре и ординатуре» и «О фонде оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации студентов и итоговой аттестации выпускников» перевод баллов рейтинга в традиционную систему оценок осуществляется по шкале:

- отлично – (90-100) % от 135 до 150 баллов;
- хорошо – (70-89) % от 105 до 134 баллов;
- удовлетворительно – (50-69) % от 75 до 104 баллов;
- неудовлетворительно – менее 50 %, т.е. меньше 75 баллов.

Приложение В
(обязательное)
Карта учебно-методического обеспечения

Дисциплины (модуля) «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Направление подготовки 11.06.01 – Электроника, радиотехника и системы связи

Направленность Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Формы обучения очная

Курс 4 Семестр 7

Часов: всего 108, лекций 24, практ. зан. 12,

СРС и виды индивидуальной работы 72

Таблица В.1 - Обеспечение Дисциплины «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

| Библиографическое описание* издания (автор, наименование, вид, место и год издания, кол. стр.) | Кол. экз. в библ. НовГУ | Наличие в ЭБС |
|--|----------------------------|---------------|
| Учебники и учебные пособия | | |
| 1 Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учеб. Пособие: для вузов/ В.И. Старосельский . – М.: Юрайт, 2011. – 463 с. | 12 | |
| Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учеб. Пособие: для вузов/ В.И. Старосельский . – М.: Юрайт, 2014. – 463 с. | 2 | |
| 2 Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий: учебн. Пособие для вузов: в 2 т. Т. 1: Физико-химические основы технологии микроэлектроники / Ю.Д. Чистяков, Ю.П. Райнова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 292 с. | 6 | |
| 3 Королев М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: Учеб. пособие: В 2-х ч. Ч. 2: Элементы и маршруты изготовления кремниевых ИС и методы их математического моделирования. / М.А.Королев, [и др.]; Под ред. Ю.А.Чаплыгина. М.: Бином, Лаборатория знаний, 2009. – 422 с. | 10 | |
| Королев М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: Учеб. пособие: В 2-х ч. Ч. 1: Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование. / М.А.Королев, [и др.]; Под ред. Ю.А.Чаплыгина. – М.: Бином, Лаборатория знаний, 2007. – 397 с. | 2 | |
| 4 Зебрев Г.И. Физические основы кремниевой нанoeлектроники: Уч. пособие для вузов / Г.И.Зебрев. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 240 с. | 10 | |
| 5 Шишкин Г.Г. Нанoeлектроника. Элементы, приборы, устройства: учеб. пособие: для вузов / Г.Г.Шишкин, И.М.Агеев. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. - 408 с. | 10 | |
| Учебно-методические издания | | |
| 1 Рабочая программа дисциплины с приложениями «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» / Автор-сост. М.Н. Петров; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2018. – 28 с. | | |

Таблица В.2 – Информационное обеспечение дисциплины (модуля)

| Название программного продукта, интернет-ресурса | Электронный адрес | Примечание |
|--|---|------------|
| 1 Образовательный математический сайт | http://www.exponenta.ru | |
| 2 Федеральный интернет-портал «Нанотехнологии и наноматериалы» | www.portalnano.ru | |
| 3 Научометрическая база данных Scopus | http://www.scopus.com/ | |
| 4 Научометрическая база данных Web of Science | http://apps.webofknowledge.com | |
| 5 Сайт компании AIM-SPICE | http://www.aimspice.com | |
| 6 Сайт компании Cadence Сайт корпорации Linear Technology | http://www.cadencepcb.com | |
| 7 Сайт корпорации Linear Technology | http://www.linear.com | |
| 8 Сайт Digital Daily Digest | www.3dnews.ru | |
| 9 Исследовательская группа V.Klimov (Los-Alamos National Laboratory) | http://quantumdot.lanl.gov/ | |

Таблица В.3 – Дополнительная литература

| Библиографическое описание* издания (автор, наименование, вид, место и год издания, кол. стр.) | Кол. экз. в библ. НовГУ | Наличие в ЭБС |
|---|----------------------------|---------------|
| 1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов : в 2 ч. Ч. 1 / Г. Красников. - М. : Техносфера, 2002. - 413 с. | 2 | |
| Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов : в 2 ч. Ч. 2 / Г. Красников. - М. : Техносфера, 2004. - 535 с. | 2 | |
| Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов / Г. Я. Красников. - 2-е изд., испр. - М. : Техносфера, 2011. - 799, [1] с. | 4 | |
| 2. Пул Ч. Нанотехнологии : учеб. пособие для вузов / Ч. Пул-мл., Ф. Оуэнс ; пер. с англ. под ред. Ю. И. Головина, доп. В. В. Лучинина. - 2-е изд., доп. - М. : Техносфера, 2006. - 334 с. : ил. | 1 | |
| Пул Ч. Нанотехнологии : учеб. пособие / Ч. Пул-мл., Ф. Оуэнс ; пер. с англ. под ред. Ю. И. Головина, доп. В. В. Лучинина. - 2-е изд., доп. - М. : Техносфера, 2005. - 334 с. : ил. | 1 | |

СОГЛАСОВАНО

НБ НовГУ:

должность

подпись

расшифровка

Приложение Г (справочное)

Дополнительная литература для информации

1. Петров, М. Н. Моделирование компонентов и элементов интегральных схем: учеб. пособие для вузов / М. Н. Петров, Г.В.Гудков. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2011. – 462 с.
2. Рабаи Жан М., Чандракасан Антанта, Николич Боривож. Цифровые интегральные схемы: Методология проектирования, 2-е издание.: Пер. с англ. – М.: ООО “И.Д. Вильямс”, 2007. – 912 с.
3. Вонг Б.П., Миттал А., Цао Ю., Старр Г. Нано-КМОП-схемы и проектирование на физическом уровне. – М.: Техносфера, 2014.- 432 с.
4. Казеннов Г.Г. Основы проектирования интегральных схем и систем. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 295 с.
5. Цифровая схемотехника. Учеб. пособие. / Е.П. Угрюмов. – 3-е изд. – СПб. : БХВ, 2010. – 816 с.
6. Ефимов И. Е. Основы микроэлектроники : учебник / И. Е. Ефимов, И. Я. Козырь. - 3-е изд., стер. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2008. - 383с.
7. Борисенко В.Е. Нанoeлектроника: учеб. пособие для вузов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 223 с.
8. Анализ кристаллов интегральных схем / под общей ред. В.В. Лучинина: СПбГЭТУ. СПб, 2016. – 216 с.
9. Брайден Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2006, – 377 с.
10. Немудров В., Мартин Г. Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие. – М.: Техносфера, 2004. – 316 с.
11. Березин В. В. и др. Твердотельная революция в телевидении: Телевизионные системы на основе приборов с зарядовой связью, систем на кристалле и видеосистем на кристалле / Под ред. А. А. Умбиталиева и А. К. Цыцулина. – М.: Радио и связь, 2006. – 312 с.
12. Васильев Р.Б., Дирин Д.Н. Квантовые точки: синтез, свойства, применение. – М: ФНМ, 2007. – 34 с.
13. Шумахер У. Полупроводниковая электроника. Техническая информация, технологии и характеристики. Справочник. - Infineon Technologies AG. 2004.- 590 с.
14. Суздальев И.П. Физикохимия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.:КомКнига, 2006.
15. Деффейс К. Удивительные наноструктуры [Электронный ресурс] / К. Деффейс, С. Деффейс ; пер. с англ. под ред. Л. Н. Патрикеева. – 3-е изд. (эл.). – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 209 с.
16. Гриднев С. А. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах / Гриднев С. А. и др. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 352 с.
17. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике / Под ред. проф. Дьяконова В. П. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 688 с.
18. Игнатов А.Н. Нанoeлектроника. Состояние и перспективы развития [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А.Н. Игнатов. – М.: ФЛИНТА, 2012. — 360 с.
19. Игумнов, В. Н. Устройства функциональной электроники: учебное пособие / В. Н. Игумнов, А. П. Большаков. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2013. – 160 с.
20. Адамов Ю. Ф. Проектирование систем на кристалле. – М.: 2005. – 112 с.
21. Nanoscale Silicon Devices / Ed, by Shunri O. and Ferry D. K. – Singapore: Taylor & Francis Group, 2016. – 301 p.
22. Maiti C. K. Introducing Technology Computer-Aided Design (TCAD): Fundamentals, Simulations, and Applications. – Pan Stanford Publishing. 2017. – 433 с.

23. Goodnick S. M. and Vasileska D. Computational Electronics. – Morgan & Claypool, 2006. – 216 p.
24. Nano-semiconductors. Devices and Technology / Edited by Iniewski K. – Taylor & Francis Group, 2012. – 584 p.
25. VLSI test principles and architectures: design for testability / Edited by Laung-Terng Wang, Cheng-Wen Wu, Xiaoqing Wen. – Elsevier Inc., 2006. – 798 p.
26. Sicard E. and Bendhia S. D. Basics of CMOS Cell Design. – New York: McGraw-Hill, 2007. – 449 p.
27. Sicard E. and Bendhia S. D. Advanced CMOS Cell Design. – New York: McGraw-Hill, 2007. – 363 p.
28. Wolf W. Modern VLSI Design. IP-Based Design. 4-th Ed. – Pearson Education, 2009. – 631 p.
29. Microelectronics to nanoelectronics: Materials, Devices & Manufacturability / Edited by Kaul A.B. – London: Taylor & Francis Group, 2013. – 444 p.
30. Kasper E., Paul D.J. Silicon Quantum Integrated Circuits. Silicon–Germanium Heterostructure Devices: Basics and Realisations. – New York: Springer, 2005. – 367 p.
31. Brennan K. F., Brown A. S. Theory of modern electronic semiconductor devices. – Wiley and Sons, 2002. – 456 p.
32. Chips 2020: A Guide to the Future of Nanoelectronics / Editor Hoefflinger B. – London: Springer, 2012. – 496 p.
33. Semiconductor and metal nanocrystals. Edited by Klimov V.– New York: Marcel Dekker Inc, 2004. – 485 c.
34. Pulfrey D. L. Understanding Modern Transistors and Diodes. – New York: Cambridge University Press, 2010. – 355 p.
35. Cressler J. D. Silicon Earth: Introduction to Microelectronics and Nanotechnology. 2-nd Ed. – New York: Taylor & Francis Group, 2016. – 618 p.

Действительно для учебного года _____/_____

Зав. кафедрой _____
подпись И.О.Фамилия

_____ 20..... г.

