

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
С.И.Эминов
подпись И.О.Фамилия
18 мая 2018 г.
число месяц

**МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ С РАСШИРЕННЫМИ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

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

Разработал
Заведующий кафедрой ФТТМ
Б.И.Селезнев
подпись И.О.Фамилия
16 мая 2018 г.
число месяц

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

Принято на заседании кафедры ФТТМ
Протокол № 8 от 16 мая 2018 г.
Заведующий кафедрой ФТТМ
Б.И.Селезнев
подпись И.О.Фамилия
16 мая 2018 г.
число месяц

1 Цели и задачи дисциплины (модуля)

Целью дисциплины (модуля) «Микроэлектронные приборы с расширенными эксплуатационными характеристиками» является формирование компетентности студентов в области физики и технологии СВЧ микроэлектронных приборов на арсениде галлия на примере полевых транзисторов с управляющим барьером Шоттки и в области разработки и производства силовых твердотельных приборов на основе нитрид-галлиевой технологии на примере диодов Шоттки.

Основными задачами модуля являются:

- сформировать у слушателей образовательной программы знания основ физики и технологии арсенида галлия и широкозонных полупроводниковых соединений типа $A^{III}N$;
- формирование системы знаний, касающихся принципа действия, конструкций и технологии полевых транзисторов с барьером Шоттки на GaAs и диодов Шоттки на GaN;
- выработка умения оценивать важнейшие электрические характеристики полевых транзисторов с барьером Шоттки на GaAs и диодов Шоттки на GaN.

2 Место дисциплины (модуля) ОП направления подготовки

Дисциплина (модуль) Б.1.ВВ.1.1 «Микроэлектронные приборы с расширенными эксплуатационными характеристиками» направлен на изучение модуля «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» и подготовку к сдаче кандидатского экзамена, входит в модули по выбору блока Б.1.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 «Микроэлектронные приборы с расширенными эксплуатационными характеристиками» 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-6 (универсальная компетенция) – способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития;
- ОПК-1 (обще профессиональная компетенция) – владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности;
- ПК-1 (профессиональная компетенция) – способность учитывать современные тенденции развития электроники в своей профессиональной деятельности;
- ПК-2 (профессиональная компетенция) – способность планировать и организовывать экспериментальные исследования, научные семинары в области электроники, уметь составлять и оформлять научно-техническую документацию, научные отчеты, доклады и статьи;
- ПК-3 (профессиональная компетенция) – способность адаптировать и обобщать результаты исследований в области электроники для целей преподавания специальных дисциплин в вузе;
- 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-6 (31)	Знать: - возможные сферы и направления профессиональной самореализации; приемы и технологии целеполагания и целереализации; пути достижения более высоких уровней профессионального и личного развития.	Не знает	Знает основные понятия	Знает на достаточном уровне	Знает на высоком уровне

УК-6 (У1)	Уметь: - ставить цели, задачи и применять технологии самоопределения, самостоятельно формулировать предметно-научные и методологические проблемы, выдвигать гипотезы для их решения и анализировать их	Не умеет	В основном умеет	Умеет в достаточной мере	Умеет в полной мере
УК-6 (В1)	Владеть: - навыками управления и организации самостоятельной деятельности по самосовершенствованию и профессиональному развитию	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
ПК-1 (З2)	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 (У4)	Уметь: - выбирать для достижения целей исследования современные методы технологии, измерений и моделирования	Не умеет	В основном умеет	Умеет в достаточной мере	Умеет в полной мере
ПК-1 (В4)	Владеть: - способностью к применению перспективных электронных и информационных технологий при разработке электронной компонентной базы	Не владеет	Владеет основными навыками	Владеет навыками в достаточной мере	Владеет навыками в полной мере

ПК-2 (ЗЗ)	Знать: - методики проведения теоретических и экспериментальных исследований, в том числе моделирования, в области твердотельной электроники, микро- и нанoeлектроники, радиоэлектронных компонентов, приборов на квантовых эффектах с использованием перспективных методов и технологий	Не знает	Знает основные понятия	Знает на достаточном уровне	Знает на высоком уровне
ПК-2 (У2)	Уметь: - выявлять проблемные места в области современной электронной компонентной базы, формулировать проблемы для исследования; ставить цель и конкретизировать ее на уровне задач;	Не умеет	В основном умеет	Умеет в достаточной мере	Умеет в полной мере
ПК-2 (У3)	- проводить с использованием современных технологий и методов теоретические и экспериментальные исследования новых процессов и явлений в электронике, позволяющих повысить характеристики электронной компонентной базы;				
ПК-2 (У4)	- обоснованно выбирать измерительное и диагностическое оборудование при организации экспериментальных исследований				
ПК-2 (В2)	Владеть: - передовыми программными продуктами и новейшими аппаратными средствами проведения теоретических и экспериментальных исследований в области твердотельной электроники, микро- и нанoeлектроники, радиоэлектронных компонентов, приборов на квантовых эффектах	Не владеет	Владеет основными навыками	Владеет навыками в достаточной мере	Владеет навыками в полной мере
ПК-3 (ЗЗ)	Знать: - математические методы обработки результатов исследований	Не знает	Знает основные понятия	Знает на достаточном уровне	Знает на высоком уровне
ПК-3 (У2)	Уметь: - разработать комплексное учебно- и научно-методическое обеспечение (методы, технологии, дидактические ресурсы, отчеты, презентации, конспекты лекций, методические указания и т.д.) по теме исследований, в том числе и для реализации образовательных программ высшего образования по направлению «Электроника и нанoeлектроника»;	Не умеет	В основном умеет	Умеет в достаточной мере	Умеет в полной мере

ПК-3 (У3)	- обоснованно выбирать измерительное и диагностическое оборудование при организации экспериментальных исследований.				
ПК-3 (В2)	Владеть: - передовыми программными продуктами и новейшими аппаратными средствами проведения теоретических и экспериментальных исследований в области твердотельной электроники, микро- и наноэлектроники, радиоэлектронных компонентов, 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 наноэлектроники, радиоэлектронных компонентов, приборов на квантовых эффектах;				
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 наноэлектроники, радиоэлектронных компонентов, приборов на квантовых эффектах;	Не знает	Знает основные понятия	Знает на достаточном уровне	Знает на высоком уровне
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.				
ПК-4 (У1)	Уметь: - определить оптимальную методологию научных исследований и направление проектных работ, направленных на совершенствование существующих перечисленных приборов, компонентов, изделий, повышение их функциональных и эксплуатационных характеристик, а также эффективности применения;	Не умеет	В основном умеет	Умеет в достаточной мере	Умеет в полной мере
ПК-4 (У2)	- исследовать и моделировать				

ПК-4 (У3)	<p>функциональные и эксплуатационные характеристики изделий, включая вопросы качества, долговечности, надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам, а также вопросы эффективного применения;</p> <p>- формировать физические и математические модели приборов, компонентов, изделий электроники, в том числе для систем автоматизированного проектирования;</p>				
ПК-4 (У4)	<p>- по результатам исследований физических и технических принципов создания приборов, компонентов, изделий предлагать физические принципы создания новых и совершенствования традиционных приборов твердотельной электроники, радиоэлектронных компонентов, изделий микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах, включая оптоэлектронные приборы и преобразователи физических величин (сенсоры;)</p>				
ПК-4 (В2)	<p>Владеть:</p> <p>- современными компьютерными программами по моделированию и проектированию приборов, компонентов, изделий электроники;</p>				
ПК-4 (В3)	<p>- навыками создания физических и математических моделей приборов, компонентов, изделий электроники;</p>	Не владеет	Владеет основными навыками	Владеет навыками в достаточной мере	Владеет навыками в полной мере
ПК-4 (В4)	<p>- методами исследования технологических основ создания и совершенствования приборов, компонентов, изделий электроники;</p>				
ПК-4 (В5)	<p>- методами диагностики приборов, компонентов, изделий электроники</p>				

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)	Всего	Распределение по семестрам
		4 СЕМЕСТР
Трудоемкость «дисциплины» в зачетных единицах (ЗЕТ)	4	4
Распределение трудоемкости по видам УР в академических часах (АЧ):	144	144
<i>Раздел 1. Полуизолирующий арсенид галлия – материал для создания СВЧ микроэлектронных приборов</i>	45	45
- лекции	3	3
- практические занятия (семинары)	2	2
- лабораторные работы		
- аудиторная СРС		
- внеаудиторная СРС	40	40
<i>Раздел 2. Структура, принцип действия и основные характеристики ПТШ на арсениде галлия</i>	45	45
- лекции	4	4
- практические занятия (семинары)	4	4
- лабораторные работы		
- аудиторная СРС		
- внеаудиторная СРС	37	37
<i>Раздел 3. Нитрид галлия и приборы на его основе</i>	54	54
- лекции	5	5
- практические занятия (семинары)	4	4
- лабораторные работы		
- аудиторная СРС		
- внеаудиторная СРС	45	45
Аттестация:	Зачет	Зачет
- зачеты*		
- экзамены		

*) - зачеты принимаются в часы контактной (аудиторной) работы.

Заочная форма обучения

Учебная работа (УР)	Всего	Распределение по семестрам
		5 СЕМЕСТР
Трудоемкость «дисциплины» в зачетных единицах (ЗЕТ)	4	4
Распределение трудоемкости по видам УР в академических часах (АЧ):	144	144
<i>Раздел 1. Полуизолирующий арсенид галлия – материал для создания СВЧ микроэлектронных приборов</i>	45	45
- лекции	2	2
- практические занятия (семинары)	2	2
- лабораторные работы		
- аудиторная СРС		
- внеаудиторная СРС	41	41
<i>Раздел 2. Структура, принцип действия и основные характеристики ПТШ на арсениде галлия</i>	45	45
- лекции	3	3
- практические занятия (семинары)	2	2
- лабораторные работы		
- аудиторная СРС		
- внеаудиторная СРС	40	40
<i>Раздел 3. Нитрид галлия и приборы на его основе</i>	54	54
- лекции	3	3
- практические занятия (семинары)	2	2
- лабораторные работы		
- аудиторная СРС		
- внеаудиторная СРС	49	49
Аттестация:		
- зачеты*	Зачет	Зачет
- экзамены		

4.2 Содержание и структура разделов дисциплины

Раздел 1. Полуизолирующий арсенид галлия – материал для создания СВЧ микроэлектронных приборов

1.1 Свойства арсенида галлия

Преимущества арсенида галлия. Основные требования к материалу подложки и активного слоя ПТШ. Получение и основные свойства. Глубокие уровни в арсениде галлия. Эффект компенсации. Четырехуровневая и трехуровневая модели электропроводности полуизолирующего арсенида галлия. Методы измерения параметров полуизолирующего арсенида галлия. Интегральная оценка качества полуизолирующего арсенида галлия.

1.2 Формирование ионно-легированных слоев арсенида галлия.

Проблемы получения ионно-легированных слоев арсенида галлия. Прямая ионная имплантация кремния в полуизолирующий арсенид галлия. Нарушения структуры при ионной имплантации. Термический отжиг имплантированных слоев GaAs. Защитные покрытия при проведении отжига имплантированных слоев. Импульсный отжиг имплантированных слоев GaAs. Применение собственных оксидов для формирования ионно-легированных слоев.

Раздел 2. Структура, принцип действия и основные характеристики ПТШ на арсениде галлия

2.1 Основные характеристики и параметры ПТШ.

Типовая конструкция ПТШ и важнейшие параметры его структуры, определяющие его частотные свойства. Конструкции GaAs-ПТШ. Конструктивно-технологические типы ПТШ. Важнейшие параметры структуры. Толщина и свойства слоев, способы их формирования. Длина затвора. Ширина и единичная ширина затвора. Топология ПТШ малой мощности. Разновидности и модификация в зависимости от частотного диапазона. Двухзатворные ПТШ. Топология ПТШ в аналоговых и цифровых интегральных схемах. Особенности структуры, топологии и конструкции ПТШ средней и большой мощности. Статические характеристики. Напряжение отсечки и начальный ток стока ПТШ. Усилительные и шумовые параметры. Параметры режима малого сигнала в СВЧ диапазоне. Минимальный коэффициент шума и оптимальный коэффициент усиления по мощности. Оптимальный источник сигнала. Эквивалентное шумовое сопротивление. Параметры режима большого сигнала. Порог перегрузки, максимальная выходная мощность.

2.2 Полупроводниковые гетероструктуры.

Гетеропереходы. Сверхрешетки. Селективное легирование. Двумерный электронный газ. Гетероструктурные полевые транзисторы: НЕМТ, рНЕМТ, mНЕМТ. Подвижность электронов в квантовой яме AlGaAs/GaAs/AlGaAs. Технология полевых транзисторов на псевдоморфных гетероструктурах с квантовой ямой. Статические, динамические и СВЧ характеристики рНЕМТ транзисторов. Моделирование гетероструктурных транзисторов с использованием САПР. Применение гетероструктур в СВЧ электронике.

2.3 Технология изготовления GaAs-ПТШ и интегральных схем на их основе. Ключевые проблемы технологии GaAs-ПТШ: формирование затворов субмикронной длины, получение совершенных омических контактов, изоляция периферии, и пути их решения. Технологические процессы изготовления GaAs-ПТШ. Изготовление GaAs-ПТШ на структурах арсенида галлия с контактным слоем (САГ-2К). Изготовление GaAs-ПТШ с ионно-легированным каналом на основе полуизолирующего арсенида галлия. Технологические маршруты изготовления ПТШ. Подготовка поверхности пластин. Химическое и ионно-химическое травление. Формирование системы контактной металлизации. Формование затвора и контактных площадок. Технологические процессы с самосовмещением затвора. Технология изготовления монолитных GaAs СВЧ ИС.

Раздел 3. Нитрид галлия и приборы на его основе

3.1 Нитриды III группы как материалы для силовой и СВЧ электроники.

Основные свойства нитридов III группы. Формирование эпитаксиальных структур нитридов III группы. Формирование ионно-легированных структур нитридов III группы.

3.2 Диоды Шоттки.

Общие представления. Барьеры Шоттки. Омические контакты. Синтез компактной (SPICE) модели диода Шоттки на GaN. Экстракция групп параметров из измерений ВАХ и ВФХ. Экстракция групп параметров, характеризующих электрофизические характеристики барьера Шоттки.

3.3 Технология изготовления диодов Шоттки на основе нитрида галлия и транзисторов на основе гетеропереходов AlGaIn/GaN.

Технологическая схема формирования структур диодов Шоттки. Создание n- и p-слоев на нитриде галлия методом ионной имплантации. Формирование омических контактов и барьера Шоттки. Технологические операции по формированию транзисторных структур. Влияние омических контактов на выходные характеристики микроприборов. Использование ионной имплантации для формирования сильнолегированных подконтактных областей. Применение защитных сильнолегированных слоев. Основные характеристики транзисторов.

3.4 Измерение параметров приборных структур на основе нитридов III группы. Структура и основные технические характеристики измерительного комплекса. Измерение ВАХ и ВФХ структур диодов Шоттки на пластине.

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 «Микроэлектронные приборы с расширенными эксплуатационными характеристиками» и достижении 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 даны в Приложении А.

5 Контроль и оценка качества освоения дисциплины (модуля)

Контроль качества освоения аспирантами дисциплины «Микроэлектронные приборы с расширенными эксплуатационными характеристиками» 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 «Микроэлектронные приборы с расширенными эксплуатационными характеристиками» (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 EPS150Triaх (на базе MPS150)

Система для измерения параметров п/п приборов Keithley4200-SCS

Система установки и поддержания температуры АС-3

Компрессор Atlas Copco.

Учебно-научная лаборатория атомно-силовой микроскопии –1315:

опто-электронная система морфологического анализа, в составе исследовательский модуль Наноздуюкатор 11; опто-электронная система морфологического анализа, в составе исследовательский модуль 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.

Презентации:

– разработка и производство электронной компонентной базы ОАО «ОКБ-Планета» (Великий Новгород);

– научно-образовательный центр «Нанотехнологии», НИЯУ МИФИ (Москва);

– Микроприборы на основе микро- и нанослоевых композиций соединений A^3B^5 для СВЧ, силовой и оптической электроники с расширенными эксплуатационными характеристиками.

– ***Мультимедийная учебная лаборатория – 1313***

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 «Микроэлектронные приборы с расширенными эксплуатационными характеристиками»

Целью занятий по дисциплине (модулю) «Микроэлектронные приборы с расширенными эксплуатационными характеристиками» является формирование компетентности студентов в области физики и технологии СВЧ микроэлектронных приборов на арсениде галлия на примере полевых транзисторов с управляющим барьером Шоттки, гетероструктурных полевых транзисторов рНЕМТ и в области разработки и производства силовых твердотельных приборов на основе нитрид-галлиевой технологии на примере диодов Шоттки.

Задачами занятий являются:

- ознакомление с материаловедческими проблемами создания микроприборов на основе соединений A_3B_5 ;
- изучение принципа действия и характеристик микроприборов на основе арсенида галлия и нитрида галлия;
- изучение технологических особенностей изготовления современных приборов СВЧ и силовой электроники;
- получение практических навыков измерений характеристик микроструктур на современном диагностическом оборудовании.

Структура и содержание основных разделов представлены в приложении А 1. Лекционная работа проводится с использованием мультимедийной аудитории с демонстрацией презентаций, представленных в разделе 7. Заслушиваются доклады по тематике рефератов.

Примерные темы рефератов:

- Полуизолирующий арсенид галлия – исходный материал для производства СВЧ микроэлектронных приборов.
- Ионная имплантация арсенида галлия.
- Эпитаксиальные структуры на арсениде галлия.
- ПТШ на арсениде галлия.
- Гетероструктурные полевые транзисторы рНЕМТ.
- Технологические особенности изготовления СВЧ микроприборов на арсениде галлия.
- Измерение параметров приборных структур на основе арсенида галлия.
- Основные свойства нитридов III группы.
- Диоды Шоттки на нитриде галлия.
- Технология изготовления диодов Шоттки на основе нитрида галлия.
- Технология изготовления транзисторов на основе гетеропереходов AlGaIn/GaN.
- Омические контакты для приборных структур на нитриде галлия.
- Измерение параметров приборных структур на основе нитридов III группы.

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.

Контрольные вопросы:

- Схема компенсации полуизолирующего арсенида галлия.
- Характеристики эпитаксиальных структур на арсениде галлия.
- Двумерный электронный газ.
- Полевые транзисторы на арсениде галлия.
- Вольтамперные характеристики полевых транзисторов с барьером Шоттки.
- Топология ПТШ малой мощности.
- Эквивалентная схема ПТШ.
- Омические контакты к арсениду галлия.
- Эквивалентная схема ПТШ.
- Основные параметры нитрида галлия.
- Подложки при формировании эпитаксиальных структур нитрида галлия.
- Формирование ионно-легированных структур нитрида галлия.
- Модели диода Шоттки на нитриде галлия.
- Характеристики транзисторов на основе гетеропереходов AlGaIn/GaN.
- Измерение ВАХ и ВФХ структур диодов Шоттки на пластине.

Практические занятия заключаются в ознакомлении со сложным аналитическим оборудованием, представленным в разделе 7: зондовые измерения, атомно-силовая микроскопия, ИК Фурье спектроскопия, холловские измерения. Изучение описаний оборудования выносится на самостоятельную работу. На практических занятиях решаются задачи и осуществляется тестовый контроль.

Пример:

Полевой транзистор с барьером Шоттки на основе арсенида галлия изготавливается методом ионной имплантации донорной примеси α -элемента 4 группы Si в полуизолирующий арсенид галлия. В подзатворную область на глубину $d_k = 0,05 \dots 0,2$ мкм проводится имплантация донорной примеси до концентрации $n = 10^{23}$ м⁻³. Величина d_k определяется требуемым значением контактного напряжения канала $U_{зап}$:

$$d_k = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon U_{зап}}{qn}}$$

где $\varepsilon \approx 13,1$ – диэлектрическая проницаемость GaAs,

Области истока и стока легируются до концентрации донорной примеси $n^+ = 10^{24}$ м⁻³. Невыпрямляющие (омические) контакты к областям истока стока выполняются из сплава Au-Ge. Барьер Шоттки создается за счет напыления на поверхность кристалла сплавов Ti-Wi, Si-Wi, или металлов Mo, Ti, Pt, Au. Эти материалы характеризуются довольно высоким значением напряжения барьера Шоттки $U_{бш} \approx 0,8$ В. Напряжение запираения (отсечки) ПТШ U_0 , определяется из выражения

$$U_0 = U_{\text{бш}} - U_{\text{зап}} = U_{\text{бш}} - \frac{qnd_{\text{к}}^2}{2\varepsilon_0\varepsilon}.$$

Знак напряжения отсечки у ПТШ может быть как положительным, так и отрицательным и определяется величиной контактного напряжения $U_{\text{зап}}$.

Расчет: Определить напряжение запираения (отсечки) U_0 при значениях $d_{\text{к}} = 0,05$ мкм и $d_{\text{к}} = 0,2$ мкм. Принимая $U_{\text{бш}} = 0,8$ В, $n = 10^{23}$ м⁻³, $\varepsilon \approx 13,1$, получаем при $d_{\text{к}} = 0,05$ мкм значение $U_0 = +0,6$ В. При $d_{\text{к}} = 0,2$ мкм получаем отрицательное значение $U_0 = -2$ В. В практических случаях величина U_0 для GaAs транзисторов может лежать в пределах от +0,2 В до -2,5 В.

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

Вопросы для самостоятельной работы аспирантов:

- Конструктивно-технологические типы ПТШ.
- Проблемы моделирования СВЧ элементов.
- Усилительные и шумовые параметры ПТШ.
- Порядок измерения электрических параметров и характеристик ПТШ.
- Порядок расчета характеристик ПТШ.
- Свойства электронного газа в сверх решетках.
- Сравнение статических, динамических и СВЧ характеристик ПТШ и рНЕМТ транзисторов.
- Атомно-силовая микроскопия.
- Использование АСМ для исследования морфологии металлизации омического контакта.
- Холловские измерения структур на арсениде галлия и нитриде галлия.
- Защитные диэлектрические покрытия. Метод ИК Фурье спектроскопии.
- Технология микропрофилирования для формирования микроприборов на нитриде галлия.
- Создание невжигаемых омических контактов к нитриду галлия.
- Вжигаемые омические контакты к нитриду галлия.
- Зондовые измерения микроструктур на пластине.

Таблица А.1 – Организация изучения дисциплины «Микроэлектронные приборы с расширенными эксплуатационными характеристиками»

Раздел модуля	Технология и форма проведения занятий	Задания на СРС	Дополнительная литература и интернет-ресурсы
Раздел 1. Полуизолирующий арсенид галлия – материал для создания СВЧ микроэлектронных приборов			
1.1 Свойства арсенида галлия	– вводная лекция	– изучение дополнительной литературы	<p>1 Васильев А.Г. СВЧ транзисторы на широкозонных полупроводниках: учебное пособие для вузов / А.Г. Васильев, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой. – М.: Техносфера, 2011. – 253 с.</p> <p>2 Петров М.Н. Моделирование компонентов и элементов СБИС: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности 210104 (210100 «Микроэлектроника и твердотельная электроника /М.Н. Петров, Г.В. Гудков; Новгород. гос. ун-т им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2006. – 584 с.</p> <p>3 Анализ кристаллов интегральных схем/ под общей ред. В.В. Лучинина; СПбГЭТУ. СПб.– 2016. – 216 с.</p> <p>4 Терагерцовые системы и технологии (обзор современного состояния / Г.З. Гареев // СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – 2015. – 228 с.</p>
1.2 Формирование ионно-легированных слоев арсенида галлия	– информационная лекция – решение задач с обсуждением результатов	– изучение дополнительной литературы	
Раздел 2. Структура, принцип действия и основные характеристики ПТШ на арсениде галлия			
2.1 Структура, принцип действия и основные характеристики ПТШ на арсениде галлия	– обсуждение результатов рубежного контроля по УЭМ1 – информационная лекция – решение задач с обсуждением результатов	– подготовка к практическим занятиям; – решение задач – изучение дополнительной литературы	<p>1 Васильев А.Г. СВЧ транзисторы на широкозонных полупроводниках: учебное пособие для вузов / А.Г.Васильев, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой. – М.: Техносфера, 2011. – 253 с.</p> <p>2 Петров М.Н. Моделирование компонентов и элементов СБИС: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности 210104 (210100 «Микроэлектроника и твердотельная электроника /М.Н. Петров, Г.В. Гудков; Новгород. гос. ун-т им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2006. – 584 с.</p> <p>3. Ефимов И. Е. Основы микроэлектроники : учебник /</p>
2.2 Полупроводниковые гетероструктуры	– информационная лекция – проведение и защита лабораторных работ – проведение ПЗ	– решение задач – изучение дополнительной литературы	

Раздел модуля	Технология и форма проведения занятий	Задания на СРС	Дополнительная литература и интернет-ресурсы
2.3 Технология изготовления GaAs-ПТШ и интегральных схем на их основе	<ul style="list-style-type: none"> – опрос – информационная лекция – проведение и защита лабораторных работ – решение задач с обсуждением результатов 	<ul style="list-style-type: none"> – решение задач – изучение дополнительной литературы – подготовка реферата 	<p>И. Е. Ефимов, И. Я. Козырь. - 3-е изд., стер. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2008. - 383с.</p> <p>4 Борисенко В.Е. Нанoeлектроника: учеб. пособие для вузов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 223 с.</p>
Раздел 3. Нитрид галлия и приборы на его основе			
3.1 Нитриды III группы как материалы для силовой и СВЧ электроники	<ul style="list-style-type: none"> – информационная лекция – решение тестового задания 	<ul style="list-style-type: none"> – изучение основной и дополнительной литературы 	<p>1 Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия. – М.: Техносфера, 2011. – 592 с. (Электронный ресурс)</p> <p>2 Дистанционный электронный учебный курс «Физика и технология широкозонных полупроводниковых соединений типа A^{III}N» / Б.И.Селезнев, М.Н.Петров, И.С.Телина, Г.В.Гудков, Д.Г.Федоров. – 2017. – 167 с.– Режим доступа: http:// do.novsu.ru/course/index.php?categoryid=88</p>
3.2 Диоды Шоттки	<ul style="list-style-type: none"> – информационная лекция – решение тестового задания с обсуждением результатов 	<ul style="list-style-type: none"> – изучение основной и дополнительной литературы 	<p>1 Дистанционный электронный учебный курс «Физика и технология широкозонных полупроводниковых соединений типа A^{III}N» / Б.И.Селезнев, М.Н.Петров, И.С.Телина, Г.В.Гудков, Д.Г.Федоров – 2017. – 167 с.– Режим доступа: http://do.novsu.ru/course/index.php?categoryid=88</p> <p>2 Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия. – М.: Техносфера, 2011. – 592 с. (Электронный ресурс)</p>

Раздел модуля	Технология и форма проведения занятий	Задания на СРС	Дополнительная литература и интернет-ресурсы
<p>3.3 Технология изготовления диодов Шоттки на основе нитрида галлия и транзисторов на основе гетеропереходов AlGaN/GaN.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – информационная лекция – решение тестового задания – подготовка реферата 	<ul style="list-style-type: none"> – решение задач – изучение дополнительной литературы 	<p>1 Дистанционный электронный учебный курс «Физика и технология широкозонных полупроводниковых соединений типа A^{III}N» / Б.И.Селезнев, М.Н.Петров, И.С.Телина, Г.В.Гудков, Д.Г.Федоров. – 2017. – 167 С. – Режим доступа: http://do.novsu.ru/course/index.php?categoryid=88</p> <p>2 Развитие технологии нитрида галлия и перспективы его применения в СВЧ электронике/ А. Балакирев, А. Туркин // Современная электроника. – 2015. – № 4. – С. 28-32. (Электронный ресурс).</p>
<p>3.4 Измерение параметров приборных структур на основе нитридов III группы</p>	<ul style="list-style-type: none"> – информационная лекция – решение тестового задания 	<ul style="list-style-type: none"> – изучение дополнительной литературы – заключительная лекция – подготовка к ПЗ 	<p>1 Дистанционный электронный учебный курс «Физика и технология широкозонных полупроводниковых соединений типа A^{III}N» / Б.И.Селезнев, М.Н.Петров, И.С.Телина, Г.В.Гудков, Д.Г.Федоров. – 2017. – 167 С. – Режим доступа: http://do.novsu.ru/course/index.php?categoryid=88</p> <p>2 Источник-измеритель для импульсных измерений характеристик силовых полупроводниковых структур на пластине / Г.В.Гудков, А.В.Желаннов, А.С.Ионов, Б.И.Селезнев, А.В.Штро // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. – 2018. – №1(107). – С. 8-12. (Электронный ресурс)</p>

Приложение Б
(обязательное)

Технологическая карта
дисциплины «Микроэлектронные приборы с расширенными эксплуатационными характеристиками»
семестр 4 , ЗЕТ 4 , вид аттестации Зачет , академ. часов 144 , баллов рейтинга 200

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					
Раздел 1. <i>Полуизолирующий арсенид галлия – материал для создания СВЧ микроэлектронных приборов</i>	1-5	3	2		40	Практические задания	УК-6 (31,У1,В1); ОПК-1 (31,У1,В1);	35	
1.1 Свойства арсенида галлия		1	1		16				
1.2 Формирование ионно-легированных слоев арсенида галлия		2	1		24				
Раздел 2. <i>Структура, принцип действия и основные характеристики ПТШ на арсениде галлия</i>	6-9	4	4		37	Практические задания	ПК-1 (32,У4,В4); ПК-2 (33,У2,У3, У4,В2); ПК-3 (33,У2,У3, В2); ПК-4 (32,33,34,35, 36,У1,У2, У3,У4, В2,В3,В4, В5)	35	
2.1 Структура, принцип действия и основные характеристики ПТШ на арсениде галлия		2	2		18				
2.2 Полупроводниковые гетероструктуры		1	1		9				
2.3 Технология изготовления GaAs-ПТШ и интегральных схем на их основе		1	1		10				
Раздел 3. <i>Нитрид галлия и приборы на его основе</i>	10-18	5	4		45	Тестовые задания		80	
3.1 Нитриды III группы как материалы для силовой и СВЧ электроники		1	1		10				
3.2 Диоды Шоттки		1	1		10				
3.3 Технология изготовления диодов Шоттки на основе нитрида галлия и транзисторов на основе гетеропереходов AlGaIn/GaN.		2	1		15				
3.4 Измерение параметров приборных структур на основе нитридов III группы		1	1		10				
Промежуточная аттестация (семестровый контроль)						Зачет (Реферат)		50	
Итого:	18	12	10		122			200	

(Трудоемкость разделов не должна быть, как правило, меньше двух академических часов)

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 180 до 200 баллов;
- хорошо – (70-89) % от 140 до 179 баллов;
- удовлетворительно – (50-69) % от 100 до 139 баллов;
- неудовлетворительно – менее 50 % , меньше 100 баллов.

Приложение В
(обязательное)
Карта учебно-методического обеспечения

Дисциплины (модуля) «Микроэлектронные приборы с расширенными эксплуатационными характеристиками»

Направление 11.06.01 – Электроника, радиотехника и системы связи

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

Формы обучения очная

Курс 2 Семестр 4

Часов: всего 144, лекций 12, практ. зан. 10,

СРС и виды индивидуальной работы 122

Таблица В.1 - Обеспечение дисциплины «Микроэлектронные приборы с расширенными эксплуатационными характеристиками» учебными изданиями

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 нанртехнологий: 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 Наноэлектроника. Теория и практика: учеб. для вузов / авт.: В.Е.Борисенко [и др.]. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. - 366 с.	7	
4 Шишкин Г.Г. Наноэлектроника. Элементы, приборы, устройства: учеб. пособие: для вузов / Г.Г.Шишкин, И.М.Агеев. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. - 406 с.	10	
5 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.	15	
Учебно-методические издания		
1 Дистанционный электронный учебный курс «Физика и технология широкозонных полупроводниковых соединений типа A ^{III} N» / Селезнев Б.И., Петров М.Н., Телина И.С., Гудков Г.В., Федоров Д.Г. – 2017 – 167 с.		http://do.novsu.ru/course/index.php?categoryid=88
2 Рабочая программа дисциплины с приложениями «Микроэлектронные приборы с расширенными эксплуатационными характеристиками» / Автор-сост. Б.И. Селезнев; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2018. – 24 с.		

Таблица В.2 – Информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Название программного продукта, интернет-ресурса	Электронный адрес
1 Сайт компании Synopsys http://www.synopsys.com Образовательный математический сайт http://www.exponenta.ru/ / 5 6 http://www.exponenta.ru/	http://www.synopsys.com
2 Федеральный интернет-портал «Нанотехнологии и наноматериалы»	www.portalnano.ru
3 Сайт компании AIM-SPICE	http://www.aimspice.com
4 Сайт компании Cadence	http://www.cadencepcb.com
5 Сайт Digital Daily Digest	www.3dnews.ru
6. Сайт научной библиотеки НовГУ	http://www.novsu.ru/dept/1114
7.БиблиоТех – электронно-библиотечная система	http://www.novsu.ru/dept/1114/bibliotech/
Электронный каталог библиотеки НовГУ имени Ярослава Мудрого	http://mars.novsu.ac.ru/MarcWeb/
Собственная электронная библиотека	http://www.novsu.ru/dept/1114/i.2464/?id=3153
ЭБС издательского центра «Лань»	http://e.lanbook.com/
Электронно-библиотечная система «ЭБС ЮРАЙТ»	www.biblio-online.ru
Электронная библиотечная система «Национальный цифровой ресурс «Рукопт»	http://rucont.ru/
ООО Научная электронная библиотека.	http://elibrary.ru/
Федеральный центр информационно-образовательных ресурсов	http://fcior.edu.ru
Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов	http://school-collection.edu.ru
Портал «Российское образование».	www.edu.ru
Государственная публичная научно-техническая библиотека России	http://gpntb.ru
Российская национальная библиотека	www.rsl.ru

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 Васильев А.Г. СВЧ транзисторы на широкозонных полупроводниках: учебное пособие для вузов / А.Г. Васильев, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой. – М.: Техносфера, 2011. – 253 с.	5	
2 Петров М.Н. Моделирование компонентов и элементов СБИС: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности 210104 (210100 «Микроэлектроника и твердотельная электроника /М.Н. Петров, Г.В. Гудков; Новгород. гос. ун-т им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2006. – 584 с.	10	
3 Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия. – М.: Техносфера, 2011. – 592 с. (Электронный ресурс)		http://www.tecnosphera.ru/files/book_pdf/0/book_283_4_26.pdf
4 Источник-измеритель для импульсных измерений характеристик силовых полупроводниковых структур на пластине /Гудков Г.В., Желаннов А.В., Ионов А.С., Селезнев Б.И., Штро А.В./ Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. – 2018. – №1(107). – С. 8-12. (Электронный ресурс)		https://www.novsu.ru/vestnik/vestnik/i.78099/?article=1453364
5 Развитие технологии нитрида галлия и перспективы его применения в СВЧ электронике/ А. Балакирев, А. Туркин // Современная электроника. – № 4.– 2015. – С. 28-32. (Электронный ресурс).		https://www.prosoft.ru/cms/f/461852.pdf

Действительно для учебного года _____ / _____

Зав. кафедрой _____
подпись И.О.Фамилия

_____ 20..... г.

СОГЛАСОВАНО

НБ НовГУ: _____
должность подпись расшифровка

