



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Физический факультет

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Кафедра инженерной физики

Образовательная программа
11.04.04- Электроника и нанoeлектроника

Программа магистратуры
Материалы и технологии электроники и нанoeлектроники

Уровень высшего образования
Магистратура

Форма обучения:
Очная

Статус дисциплины:
Базовая

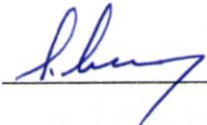
Махачкала 2019

Рабочая программа дисциплины составлена в соответствии с требованиями ФГОСЗ++ ВО по направлению подготовки 11.04.04- Электроника и наноэлектроника, программа магистратуры: Материалы и технологии электроники и наноэлектроники – Приказ Минобрнауки России от 05.04.2017 №301.

Разработчик (и): кафедра инженерной физики, Садыков С.А., д.ф.-м.н., профессор

Рабочая программа дисциплины одобрена:

на заседании кафедры инженерной физики от «3» _сентября_2019г., протокол № 1

Зав. кафедрой —  Садыков С.А.

на заседании Методической комиссии физического факультета от « 20 » сентября 2019г., протокол № 1.

Председатель —  Мурлиева Ж.Х.

Рабочая программа дисциплины согласована с учебно-методическим управлением

_____ Нач. УМУ  Гасангаджиева А.Г.

Аннотация рабочей программы

1. Цели освоения дисциплины
2. Место дисциплины в структуре ОПОП магистратуры
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины
4. Объем, структура и содержание дисциплины
5. Образовательные технологии
6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов
7. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины
 - 7.1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы
 - 7.2. Типовые контрольные задания
 - 7.3. Методические материалы, определяющие процедуру оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций.
8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины
9. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины
10. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины
11. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем
12. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Аннотация рабочей программы дисциплины

Дисциплина **Физика полупроводников и диэлектриков** входит в базовую часть образовательной программы магистратуры по направлению (специальности) **11.04.04 – Электроника и наноэлектроника**.

Дисциплина реализуется на физическом факультете кафедрой инженерной физики.

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с теоретическими основами физики полупроводников и диэлектриков и их свойствами.

Дисциплина нацелена на формирование следующих компетенций выпускника:

общепрофессиональных: ОПК-1; ОПК-2; ОПК-3.

Преподавание дисциплины предусматривает проведение следующих видов учебных занятий: *лекции, практические занятия, лабораторные занятия, самостоятельная работа*.

Рабочая программа дисциплины предусматривает проведение следующих видов контроля успеваемости в форме: индивидуальное собеседование, тестирование, письменные контрольные задания и промежуточный контроль в форме экзамена.

Объем дисциплины 6 зачетных единиц, в том числе в академических часах по видам учебных занятий

Семестр	Учебные занятия								Форма промежуточной аттестации (зачет, дифференцированный зачет, экзамен)
	в том числе:								
	всего	Контактная работа обучающихся с преподавателем					СРС, в том числе экзамен		
		всего	из них						
			Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	КСР	консультации		
9	216	92	14	22	20	36		124	зачет

1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «Физика полупроводников и диэлектриков» являются формирование систематических знаний фундаментальных принципов, определяющих физические процессы в полупроводниках и диэлектриках, а также в изучении явлений и процессов в твердых телах, использующихся при разработке приборов твердотельной микро и наноэлектроники.

Задачами дисциплины является изучение основных принципов и законов физики полупроводников и диэлектриков, а также методов их физических исследований. Магистр должен владеть основами теоретических знаний для решения практических задач как в области физики полупроводников и диэлектриков, так и на междисциплинарных границах физики с другими областями знаний; владеть соответствующим математическим аппаратом для освоения основных положений теории и решения практических задач.

В результате изучения курса магистры должны:

- понимать физическую сущность процессов, протекающих в полупроводниковых и диэлектрических материалах и в структурах, созданных на основе этих материалов, в том числе и при воздействии внешних полей и изменении температуры;
- иметь опыт проведения количественных оценок величины эффектов и характеристических параметров с учётом особенностей кристаллической структуры, электронного и фононного спектров, типа и концентрации легирующих примесей.
- понимать современные тенденции в развитии физики полупроводников и диэлектриков, приборов и устройств на их основе;
- быть готовыми к самостоятельному освоению и грамотному использованию результатов новых экспериментальных и теоретических исследований в области физики полупроводников и диэлектриков, к самостоятельному выбору методов и объектов исследования.

Основные разделы программы курса: основы зонной теории полупроводников и диэлектриков. статистика электронов и дырок в полупроводниках, генерация и рекомбинация электронов и дырок, кинетические явления в полупроводниках, явления переноса в полупроводниках, оптические и фотоэлектрические явления, полупроводниковые структуры пониженной размерности, поляризация и электропроводность диэлектриков, диэлектрические потери, активные диэлектрики.

2. Место дисциплины в структуре ОПОП магистратуры

Дисциплина «Физика полупроводников и диэлектриков» в структуре ОПОП ВО находится в цикле профессиональных дисциплин (базовая часть). Для освоения дисциплины требуются знания и умения, приобретенные обучающимися в результате освоения ряда предшествующих дисциплин (разделов дисциплин), таких как:

- Квантовая механика
- Термодинамика и статфизика
- Физика конденсированного состояния
- Физические основы электроники

и знания в области математики.

Для освоения данной дисциплины магистр должен иметь основополагающие представления об основных подходах к описанию реальных физических процессов и явлений, как на классическом, так и на квантовом уровне; иметь знания о методах решения практических задач физики конденсированного состояния на основе современных математических моделей описания физических объектов; владеть фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики конденсированного состояния, а также методами

физического исследования. Магистры должны обладать навыками, необходимыми для решения конкретных физических проблем с использованием приёмов и методов математической физики; для описания разнообразных физических процессов и состояний в полупроводниках и диэлектриках.

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (перечень планируемых результатов обучения) .

Код компетенции из ФГОС ВО	Наименование компетенции из ФГОС ВО	Планируемые результаты обучения
ОПК-1. Способен представлять современную научную картину мира, выявлять естественнонаучную сущность проблем, определять пути их решения и оценивать эффективность сделанного выбора	ОПК-1.1. Выявляет и анализирует проблемы, возникающие в ходе профессиональной деятельности, основываясь на современной научной картине мира	<i>Знает:</i> • основы зонной теории полупроводников и диэлектриков, зонную структуру основных полупроводников; • основные подходы к описанию реальных физических процессов и явлений в полупроводниках и диэлектриках, как на классическом, так и на квантовом уровне; • квантовые основы современной нанотехнологии; • современные тенденции развития материаловедения твердотельной электроники; • тенденции и перспективы развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники <i>Умеет:</i> • создавать и анализировать теоретические модели физических процессов и явлений в полупроводниках и диэлектриках; • анализировать, систематизировать и обобщать научно-техническую информацию в области современного материаловедения; • самостоятельно изучать и понимать специальную научную и методическую литературу, связанную с проблемами физики полупроводников и диэлектриков, физики систем пониженной размерности; • выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, анализировать и обрабатывать соответствующую научно-техническую литературу с учетом зарубежного опыта <i>Владеет:</i> • основами теоретических знаний для решения практических задач как в об-

		ласти физики полупроводников и диэлектриков, так и на междисциплинарных границах физики микро- и наноэлектроники; • методами количественного формулирования и решения практических задач по физике полупроводников и диэлектриков. • навыками находить и критически анализировать информацию, выявлять естественнонаучную сущность проблем; • методами научного анализа проблем, определять пути их решения и оценивать эффективность сделанного выбора.
ОПК-1	ОПК-1.2. Реализует и совершенствует новые методы, идеи, подходы и алгоритмы решения теоретических и прикладных задач в области профессиональной деятельности	<i>Знает:</i> • основные понятия, идеи, методы, подходы и алгоритмы решения теоретических и прикладных задач в области электроники и наноэлектроники • новые методологические подходы к решению задач в области профессиональной деятельности; • основные подходы к описанию реальных физических процессов и явлений в полупроводниках и диэлектриках, как на классическом, так и на квантовом уровне; • современные тенденции развития материаловедения, твердотельной электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий. <i>Умеет:</i> • реализовать и совершенствовать новые методы, идеи, подходы и алгоритмы решения теоретических и прикладных задач в области профессиональной деятельности • создавать и анализировать теоретические модели физических процессов и явлений в полупроводниках и диэлектриках; • выбирать методы и средства решения конкретных задач, использовать для их решения физических измерительных приборов и приемов. • анализировать, систематизировать и обобщать научно-техническую информацию в области современного

		материаловедения; - самостоятельно изучать и понимать специальную научную и методическую литературу, связанную с проблемами физики полупроводников и диэлектриков, физики систем пониженной размерности; <i>Владеет:</i> - навыками реализовать и совершенствовать новые методы, идеи, подходы и алгоритмы решения теоретических и прикладных задач в области профессиональной деятельности - основами теоретических знаний для решения практических задач как в области физики полупроводников и диэлектриков, так и на междисциплинарных границах физики микро- и нанoeлектроники; - методологией теоретических и экспериментальных исследований в области физики полупроводников и диэлектриков; - методами количественного формулирования и решения практических задач по физике полупроводников и диэлектриков.
ОПК-1	ОПК-1.3. Проводит качественный и количественный анализ выбранного методов решения выявленной проблемы, при необходимости вносит необходимые коррективы	<i>Знает:</i> - основы качественного и количественного анализа методов решения выявленной проблемы по физике полупроводников и диэлектриков <i>Умеет:</i> - выбирать метод решения выявленной проблемы, проводить его качественный и количественный анализ, при необходимости вносить необходимые коррективы для достижения оптимального результата <i>Владеет:</i> - навыками проводить качественный и количественный анализ методов решения выявленной проблемы, оценивать эффективность выбранного метода
ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, представлять и	ОПК-2.1. Выбирает или самостоятельно формулирует тему исследования, составляет программу-ис-	<i>Знает:</i> актуальные проблемы, основные задачи, направления, тенденции и перспективы развития современной электроники и нанoeлектроники, а

аргументировано защищать результаты выполненной работы	следования	также смежных областей науки и техники • принципы составления программы исследований по выбранной теме в области изучения материалов и компонентов электроники и нанoeлектроники; <i>Умеет:</i> • самостоятельно выбирать и формулировать конкретные задачи исследований полупроводников и диэлектриков; • рассматривать возможные варианты реализации исследований полупроводников и диэлектриков, оценивая их достоинства и недостатки. <i>Владеет:</i> • навыками выбирать и формулировать конкретные задачи исследований полупроводников и диэлектриков • проводить качественный и количественный анализ методов решения выявленной проблемы, оценивать эффективность выбранного метода • навыками планировать исследования по заданной методике для эффективного решения поставленной задачи.
ОПК-2	ОПК-2.2. Самостоятельно выбирает методы исследования, разрабатывает и проводит исследования	<i>Знает:</i> • современные инновационные методики исследований, в том числе с использованием проблемно-ориентированных прикладных программных средств ; • основы качественного и количественного анализа методов решения выявленной проблемы <i>Умеет:</i> • выбирать эффективные методы исследований и разработок, новые методологические подходы к решению поставленных задач • самостоятельно разрабатывать и проводить исследования материалов и структур электроники на основе полупроводников и диэлектриков • определять контролируемые параметры исследуемых объектов <i>Владеет:</i> • опытом выявления сути материаловедческих проблем твердотельной электроники, конкретизации целей и

		задач исследований объектов; • навыками самостоятельно выбирать методы исследования, разрабатывать и проводить исследования
ОПК-2	ОПК-2.3. Анализирует, интерпретирует, оценивает, представляет и защищает результаты выполнения исследования с обоснованными выводами и рекомендациями	<i>Знает:</i> • основные приемы обработки и представления результатов выполненного исследования • требования к оформлению результатов выполненной работы; • пакеты программ по графическому представлению результатов выполненной работы. <i>Умеет:</i> • использовать основные приемы обработки, анализа и представления результатов исследований; • формулировать и аргументировать выводы и рекомендации по выполненной работе • оформлять, представлять и докладывать результаты выполненной работы; • аргументированно защищать результаты выполненной работы; • по результатам исследований материалов формулировать рекомендации по совершенствованию устройств и систем электроники и нанoeлектроники. <i>Владеет:</i> • опытом выявления сути материаловедческих проблем твердотельной электроники, конкретизации целей и задач исследований объектов навыками обработки, анализа и интерпретации полученных данных с использованием современных информационных технологий • навыками формулировать и аргументировать выводы и рекомендации по исследовательской работе, оформлять, представлять и докладывать результаты исследований; • навыками представления итогов работы в виде научных публикаций, тезисов докладов, оформления заявок на изобретения и др.; • опытом использования результатов исследований для оформления научных проектов, грантов, участия в раз-

		личных молодежных конкурсах; • опытом внедрения результатов исследований на практике.
ОПК-3. Способен приобретать и использовать новую информацию в своей предметной области, предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач.	ОПК-3.1. Демонстрирует умения получать и использовать новые знания в области профессиональной деятельности, в том числе в междисциплинарном контексте	<i>Знает:</i> • современные принципы поиска, хранения, обработки, анализа и представления информации о новых материалах и технологиях твердотельной электроники и нанoeлектроники из различных источников и баз данных в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий <i>Умеет:</i> • получать и использовать новые знания по физике и технике полупроводников и диэлектриков, в том числе в междисциплинарном контексте, с использованием информационно-коммуникационных технологий • использовать информационные источники для получения новых знаний о свойствах и области применения полупроводников и диэлектриков в электронике и нанoeлектронике. <i>Владеет:</i> • навыками использовать современные информационные технологии для приобретения новых знаний по физике и технике полупроводников и диэлектриков, в том числе в междисциплинарном контексте ; • использовать специализированные знания в области физики конденсированного состояния вещества для обеспечения технологической реализации материалов и элементов электронной техники в приборах и устройствах электроники и нанoeлектроники.
ОПК-3	ОПК-3.2. Предлагает новые идеи и подходы к решению инженерных задач с использованием современных информационных технологий	<i>Знает:</i> • возможность поиска, управления, обработки и обмена информацией при решении инженерных задач материаловедения по направлению электроники и нанoeлектроника. <i>Умеет:</i> • использовать современные информационные технологии в целях формирования новых идеи и подходов по

		применению полупроводниковых и диэлектрических материалов в решении инженерных задач; <i>Владеет:</i> • навыками предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач с использованием современных информационных технологий по применению полупроводниковых и диэлектрических материалов в решении инженерных задач.
--	--	---

4. Объем, структура и содержание дисциплины.

4.1. Объем дисциплины составляет **6** зачетных единиц, **216** академических часов.

4.2. Структура дисциплины.

№ п/п	Разделы и темы дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятель- ную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Самостоятельная работа	Формы текущего контроля успевае- мости (по неделям семестра) Форма промежу- точной аттестации (по семестрам)
				Лекции	Практические занятия	Лаборатор- ные занятия	Контроль самост. раб.		
	Модуль 1.								
1	Основы зонной тео- рии полупроводни- ков и диэлектриков.	10		2	2		4	16	(ДЗ), (С), (КСР)
2	Равновесная стати- стика электронов и дырок в полупро- водниках			2	2	4	6	14	(ЛР), (ДЗ), (С), (КСР)
	Итого по модулю 1:			4	4		10	30	
	Модуль 2								
3	Кинетические явле- ния в полупровод- никах.			2	2	8	4	14	(ЛР), (ДЗ), (С), (КСР)
4	Генерация и реком- бинация электронов и дырок в полупро- водниках			2	4		6	12	(ДЗ), (С), (КСР)
	Итого по модулю 2:			4	6		10	34	
	Модуль 3.								
5	Оптические и фото- электрические явле- ния в полупровод- никах			2	4	4	4	18	(ЛР), (ДЗ), (С), (КСР)
6	Полупроводниковые структуры пони-			2	2		4	12	(ДЗ), (С), (КСР)

	женной размерности и сверхрешетки								
	Итого по модулю 3:			4	6		8	30	
	Модуль 4.								
7	Поляризация и электропроводность диэлектриков. Диэлектрические потери.			2	2	6	4	16	(ЛР), (ДЗ), (С), (КСР)
8	Активные диэлектрики и их применение				2		4	14	(ДЗ), (С), (КСР)
	Итого по модулю 4:			2	4		8	30	
	ИТОГО: 216			14	20	22	36	124	

4.3. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам).

Модуль 1

Тема 1. Основы зонной теории полупроводников и диэлектриков

Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны. Расчеты энергетического спектра: метод сильно связанных электронов. Законы дисперсии для важнейших полупроводников. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы.

Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса. Определение параметров зонного спектра из оптических свойств.

Водородоподобные примесные центры в полупроводниках. Мелкие и глубокие уровни.

Элементарные возбуждения: электроны, дырки, поляроны, экситоны.

Тема 2. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках

Плотность состояний и функция распределения электронов. Концентрации электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний.

Вычисление положения уровня Ферми и равновесных концентраций электронов и дырок в собственном и примесном (некомпенсированном и компенсированном) полупроводнике. Многозарядные примесные центры. Определение ширины запрещенной зоны и энергетического положения примесных уровней из температурной зависимости электропроводности.

Модуль 2

Тема 3. Кинетические явления в полупроводниках.

Кинетические коэффициенты - проводимость, постоянная Холла, термо-ЭДС и эффект Пельтье; принципиальные схемы опытов. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла. Дрейфовый и диффузионный токи. Соотношение Эйнштейна. Биполярные проводимость и постоянная Холла.

Элементы кинетической теории явлений переноса. Кинетическое уравнение. Интеграл столкновений в случае упругого рассеяния и для изотропных изоэнергетических поверхностей. Время релаксации импульса. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Оптические и акустические фононы. Взаимодействие носителей заряда с акустическими, оптическими, пьезоэлектрическими фононами. Рассеяние носителей на заряженных и нейтральных примесях. Одновременное действие нескольких механизмов рассеяния. Подвижность, фактор Холла и термо-ЭДС при разных механизмах рассеяния.

Тема 4. Генерация и рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках

Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Кинетика рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.

Статистика рекомбинации электронов и дырок. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Роль прилипания. Коэффициенты и сечения захвата носителей.

Амбиполярная диффузия и амбиполярный дрейф. Эффект Дембера. Длины диффузии и дрейфа неравновесных носителей заряда.

Модуль 3

Тема 5. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках и диэлектриках

Оптические параметры и феноменологические соотношения между ними. Механизмы оптических переходов в полупроводниках. Межзонные переходы. Исследование зонной структуры по спектрам поглощения и отражения, дифференциальная спектроскопия. Поглощение и излучение вблизи края запрещенной зоны. Коэффициент поглощения для прямых и непрямых оптических переходов. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение.

Поглощение света на свободных носителях заряда. Плазменное отражение, плазменная частота. Поглощение света на колебаниях решетки. Однофононный резонанс. Спектры решеточного отражения. Рассеяние света на оптических и акустических фононах.

Влияние примесей на оптические свойства. Водородоподобные примеси, исследование их спектра по оптическому поглощению в далекой ИК-области. Примесное поглощение вблизи края запрещенной зоны в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Межпримесная излучательная рекомбинация. Внутрицентровые многофононные переходы. Связанные экситоны. Электрооптические явления.

Фотоэлектрическая спектроскопия полупроводниковых структур.

Тема 6. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки

Квантово-размерные эффекты в полупроводниках. Многоквантовые ямы и сверхрешетки. Типы сверхрешеток. Спектры поглощения и излучения в квантовых ямах и сверхрешетках.

Поглощение света и транспорт электронов в легированных и композиционных полупроводниковых сверхрешетках. Локализация Ванье-Штарка.

Модуль 4

Тема 7. Поляризация и электропроводность диэлектриков. Диэлектрические потери.

Векторы электрического поля, индукции и поляризации. Тензор диэлектрической проницаемости. Механизмы электрической поляризации. Особенности ионной поляризации. Взаимодействие электромагнитных волн с кристаллами.

Основные особенности электропроводности диэлектриков. Нелинейная электронная проводимость в условиях инжекции носителей заряда. Ионная электропроводность диэлектриков. Частотная зависимость проводимости.

Тема 8. Активные диэлектрики и их применение

Основные определения. Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект. Современные пьезоэлектрические и электрострикционные материалы.

Определение пьезоэлектрического эффекта. Пьезоэлектрические сенсорные материалы и элементы. Термопьезоэлектричество. Физические свойства электретов.

Физические основы сегнетоэлектричества. Фазовые переходы в сегнетоэлектриках. Применение сегнетоэлектриков в электронике.

4.3.1. Содержание лекционных занятий

модуль	Содержание темы
1.	<u>Лекция 1. Основы зонной теории полупроводников и диэлектриков.</u> Уравнение Шредингера для кристалла. Волновые функции Блоха. Зона Бриллюэна. Волновой вектор, импульс, скорость и эффективная масса электрона. Свойства энергетического спектра электронов, энергетические зоны. <u>Лекция 2. Статистика электронов и дырок в полупроводниках.</u> Плотность квантовых состояний. Собственные полупроводники, собственная концентрация свободных носителей заряда, уровень Ферми и температурная зависимость концентраций электронов и дырок в собственном полупроводнике. Статистика заполнения локальных уровней.
2.	<u>Лекция 3. Кинетические явления в полупроводниках.</u> Уравнение электронейтральности. Электропроводность. Основные механизмы рассеяния. Эффект Холла, магнитосопротивление. <u>Лекция 4. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда.</u> Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Механизмы рекомбинации. Уравнение непрерывности. Диффузия и дрейф носителей. Соотношение Эйнштейна.
3.	<u>Лекция 5. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках и диэлектриках</u> Поглощение света полупроводниками. Люминесценция. Механизмы излучательной рекомбинации. Фотоэлектрические эффекты. Фотопроводимость. <u>Лекция 6. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки.</u> Квантово-размерные эффекты в полупроводниках. Многоквантовые ямы и сверхрешетки.

4.	<u>Лекция 7. Физические основы поляризации диэлектриков. Электропроводность.</u> Поляризация диэлектриков. Основные механизмы поляризации диэлектриков. Комплексная диэлектрическая проницаемость, механизмы диэлектрических потерь. Механизмы электропроводности диэлектриков.
----	---

4.3.2. Темы семинарских и практических занятий

мо- дуль	Содержание темы
1.	<u>Тема 1.</u> Основные приближения зонной теории. <u>Тема 2.</u> Расчет температурной зависимости положения уровня Ферми и концентрации свободных носителей заряда в полупроводниках. Зависимость уровня Ферми от концентрации примеси и температуры для невырожденного полупроводника.
2.	<u>Тема 3.</u> Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Искривление энергетических зон в электрическом поле. <u>Тема 4.</u> Элементы кинетической теории явлений переноса. Кинетическое уравнение. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. <u>Тема 5.</u> Расчет коэффициента диффузии, длины свободного пробега и времени жизни неосновных носителей заряда.
3.	<u>Тема 6.</u> Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. <u>Тема 7.</u> Механизмы оптических переходов в полупроводниках. Примесное поглощение вблизи края запрещенной зоны в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Исследование спектров люминесценции полупроводников. <u>Тема 8.</u> Квантово-размерные эффекты в полупроводниках.
4.	<u>Тема 9.</u> Диэлектрическая спектроскопия конденсированных сред. <u>Тема 10.</u> Электрически активные диэлектрики: сегнетоэлектрики, сегнетомагнетики, пьезоэлектрики, пирозэлектрики и электреты. Применения.

4.3.3. Темы самостоятельной работы

1. Основные приближения зонной теории.
2. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Искривление энергетических зон в электрическом поле.
3. Элементарные возбуждения: электроны, дырки, поляроны, экситоны.
4. Концентрации электронов и дырок в зонах. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях.

5. Вычисление положения уровня Ферми и равновесных концентраций электронов и дырок в собственном и примесном полупроводнике.
6. Элементы кинетической теории явлений переноса. Кинетическое уравнение. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке.
7. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла. Дрейфовый и диффузионный токи.
8. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Фотопроводимость.
9. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация.
10. Механизмы оптических переходов в полупроводниках.
11. Примесное поглощение вблизи края запрещенной зоны в прямозонных и непрямозонных полупроводниках.
12. Квантово-размерные эффекты. Многоквантовые ямы и сверхрешетки. Типы сверхрешеток. Спектры поглощения и излучения в квантовых ямах и сверхрешетках.
13. Физические основы поляризации диэлектриков. Электропроводность.
14. Диэлектрические потери и диэлектрическая спектроскопия.
15. Пьезоэлектрический эффект. Пироэлектрики и электреты. Сегнетоэлектрики.

4.3.4. Темы лабораторных работ

1. Исследование температурной зависимости электропроводности полупроводников.
2. Исследование электрических свойств полупроводниковых материалов.
3. Исследование свойств полупроводниковых материалов методом Холла.
4. Исследование собственного оптического поглощения в полупроводниках.
5. Исследование сегнетоэлектриков
6. Исследование электропроводности твердых диэлектриков.
7. Исследование диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь в твердых диэлектриках.
8. Исследование электрической прочности диэлектриков.

5. Образовательные технологии

Основными видами образовательных технологий с применением, как правило, компьютерных и технических средств, учебного и научного оборудования являются:

- Информационные технологии.
- Проблемное обучение.
- Индивидуальное обучение.
- Междисциплинарное обучение.
- Опережающая самостоятельная работа.

Для достижения определенных компетенций используются следующие формы организации учебного процесса: лекция (информационная, проблемная, лекция-визуализация, лекция-консультация и др.), практическое занятие, лабораторные занятия, семинарские занятия, самостоятельная работа, консультация. Допускаются комбинированные формы проведения занятий, такие как лекционно-практические занятия.

Преподаватель самостоятельно выбирают наиболее подходящие методы и формы проведения занятий из числа рекомендованных и согласуют выбор с кафедрой.

Реализация компетентного подхода предусматривает широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий и организации внеаудиторной работы (компьютерных симуляций, деловых и ролевых игр, разбора конкретных ситуаций, психологических и иных тренингов) с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся. Интерактивное обучение – метод, в котором реализуется постоянный мониторинг освоения образовательной программы, целенаправленный текущий контроль и взаимодействие (интерактивность) преподавателя и студента в течение всего процесса обучения.

Самостоятельная работа организована в соответствии с технологией проблемного

обучения и предполагает следующие формы активности:

- самостоятельная проработка учебно-проблемных задач, выполняемая с привлечением основной и дополнительной литературы;
- поиск научно-технической информации в открытых источниках с целью анализа и выявления ключевых особенностей.

Основные аспекты применяемой технологии проблемного обучения:

- постановка проблемных задач отвечает целям освоения дисциплины «Физика конденсированного состояния» и формирует необходимые компетенции;
- решаемые проблемные задачи стимулируют познавательную деятельность и научно-исследовательскую активность студентов.

По лекционному материалу подготовлено учебное пособие, конспекты лекций в электронной форме и на бумажном носителе, большая часть теоретического материала излагается с применением слайдов (презентаций) в программе **Power Point**, а также с использованием интерактивных досок.

Обучающие и контролирующие модули внедрены в учебный процесс и размещены на Образовательном сервере Даггосуниверситета (<http://edu.icc.dgu.ru>), к которым студенты имеют свободный доступ.

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа магистров имеет целью подготовку к семинарским и практическим занятиям по отдельным разделам дисциплины, а также к выполнению лабораторных работ по предмету. Разделы дисциплины для самостоятельной работы приведены в п.п. 4.3.3. и 4.3.4.

В течение семестра магистры самостоятельно готовятся по отдельным разделам дисциплины, представляют рефераты и презентации, обсуждают выбранные темы на практических занятиях.

7. Фонд оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.

7.1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы.

Перечень компетенций с указанием этапов их формирования приведен в описании образовательной программы.

Код компетенции из ФГОС ВО	Наименование компетенции из ФГОС ВО	Планируемые результаты обучения	Процедура освоения
ОПК-1. Способен представлять современную научную картину мира, выявлять естественнонаучную сущность проблем, определять пути их решения и оценивать эффективность выбранного выбора	ОПК-1.1. Выявляет и анализирует проблемы, возникающие в ходе профессиональной деятельности, основываясь на современной научной картине мира ОПК-1.2. Реализует и совершенствует новые методы, идеи, подходы и алгоритмы решения теорети-	<i>Знает:</i> • основы зонной теории полупроводников и диэлектриков, зонную структуру основных полупроводников; • основные подходы к описанию реальных физических процессов и явлений в полупроводниках и диэлектриках, как на классическом, так и на квантовом уровне; • квантовые основы современной нанотехнологии; • современные тенденции развития материаловедения твердотельной электроники;	Устный опрос, письменный опрос, выступление на семинарах, презентации докладов.

	ческих и прикладных задач в области профессиональной деятельности ОПК-1.3. Проводит качественный и количественный анализ выбранного методов решения выявленной проблемы, при необходимости вносит	• тенденции и перспективы развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники; • основные понятия, идеи, методы, подходы и алгоритмы решения теоретических и прикладных задач в области электроники и нанoeлектроники • новые методологические подходы к решению задач в области профессиональной деятельности; • основные подходы к описанию реальных физических процессов и явлений в полупроводниках и диэлектриках, как на классическом, так и на квантовом уровне; • современные тенденции развития материаловедения, твердотельной электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий; • основы качественного и количественного анализа методов решения выявленной проблемы по физике полупроводников и диэлектриков <i>Умеет:</i> • создавать и анализировать теоретические модели физических процессов и явлений в полупроводниках и диэлектриках; • анализировать, систематизировать и обобщать научно-техническую информацию в области современного материаловедения; • самостоятельно изучать и понимать специальную научную и методическую литературу, связанную с проблемами физики полупроводников и диэлектриков, физики систем пониженной размерности; • выявлять естественнoнаучную сущность проблем, возника-	
--	--	---	--

		ющих в ходе профессиональной деятельности, анализировать и обрабатывать соответствующую научно-техническую литературу с учетом зарубежного опыта; • выбирать метод решения выявленной проблемы, проводить его качественный и количественный анализ, при необходимости вносить необходимые коррективы для достижения оптимального результата <i>Владеет:</i> • основами теоретических знаний для решения практических задач как в области физики полупроводников и диэлектриков, так и на междисциплинарных границах физики микро- и наноэлектроники; • методами количественного формулирования и решения практических задач по физике полупроводников и диэлектриков. • навыками находить и критически анализировать информацию, выявлять естественнوناучную сущность проблем; • методами научного анализа проблем, определять пути их решения и оценивать эффективность сделанного выбора • навыками реализовать и совершенствовать новые методы, идеи, подходы и алгоритмы решения теоретических и прикладных задач в области профессиональной деятельности • создавать и анализировать теоретические модели физических процессов и явлений в полупроводниках и диэлектриках; • выбирать методы и средства решения конкретных задач, использовать для их решения физических измерительных	
--	--	---	--

		приборов и приемов. • анализировать, систематизировать и обобщать научно-техническую информацию в области современного материаловедения; • самостоятельно изучать и понимать специальную научную и методическую литературу, связанную с проблемами физики полупроводников и диэлектриков, физики систем пониженной размерности;	
ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, представлять и аргументировано защищать результаты выполненной работы	ОПК-2.1. Выбирает или самостоятельно формулирует тему исследования, составляет программу исследования ОПК-2.2. Самостоятельно выбирает методы исследования, разрабатывает и проводит исследования ОПК-2.3. Анализирует, интерпретирует, оценивает, представляет и защищает результаты выполненного исследования с обоснованными выводами и рекомендациями	<i>Знает:</i> • актуальные проблемы, основные задачи, направления, тенденции и перспективы развития современной электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники • принципы составления программы исследований по выбранной теме в области изучения материалов и компонентов электроники и нанoeлектроники; • современные инновационные методики исследований, в том числе с использованием проблемно-ориентированных прикладных программных средств ; • основы качественного и количественного анализа методов решения выявленной проблемы; • основные приемы обработки и представления результатов выполненного исследования • требования к оформлению результатов выполненной работы; • пакеты программ по графическому представлению результатов выполненной работы. <i>Умеет:</i> • самостоятельно выбирать и формулировать конкретные задачи исследований полу-	Устный опрос, письменный опрос, выступление на семинарах, презентации докладов.

		проводников и диэлектриков; • рассматривать возможные варианты реализации исследований полупроводников и диэлектриков, оценивая их достоинства и недостатки. <i>Владеет:</i> • навыками выбирать и формулировать конкретные задачи исследований полупроводников и диэлектриков • проводить качественный и количественный анализ методов решения выявленной проблемы, оценивать эффективность выбранного метода • навыками планировать исследования по заданной методике для эффективного решения поставленной задачи; • опытом выявления сути материаловедческих проблем твердотельной электроники, конкретизации целей и задач исследований объектов; • навыками самостоятельно выбирать методы исследования, разрабатывать и проводить исследования; • опытом выявления сути материаловедческих проблем твердотельной электроники, конкретизации целей и задач исследований объектов навыками обработки, анализа и интерпретации полученных данных с использованием современных информационных технологий • навыками формулировать и аргументировать выводы и рекомендации по исследовательской работе, оформлять, представлять и докладывать результаты исследований; • навыками представления итогов работы в виде научных публикаций, тезисов докладов, оформления заявок на изобретения и др.; • опытом использования ре-	
--	--	---	--

		зультатов исследований для оформления научных проектов, грантов, участия в различных молодежных конкурсах; • опытом внедрения результатов исследований на практике.	
ОПК-3. Способен приобретать и использовать новую информацию в своей предметной области, предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач.	ОПК-3.1. Демонстрирует умения получать и использовать новые знания в области профессиональной деятельности, в том числе в междисциплинарном контексте ОПК-3.2. Предлагает новые идеи и подходы к решению инженерных задач с использованием современных информационных технологий	<i>Знает:</i> • современные принципы поиска, хранения, обработки, анализа и представления информации о новых материалах и технологиях твердотельной электроники и нанoeлектроники из различных источников и баз данных в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий; • возможность поиска, управления, обработки и обмена информацией при решении инженерных задач материаловедения по направлению электроники и нанoeлектроники. <i>Умеет:</i> • получать и использовать новые знания по физике и технике полупроводников и диэлектриков, в том числе в междисциплинарном контексте, с использованием информационно-коммуникационных технологий; • использовать современные информационные технологии в целях формирования новых идей и подходов по применению полупроводниковых и диэлектрических материалов в решении инженерных задач; • использовать специализированные знания в области физики конденсированного состояния вещества для обеспечения технологической реа-	Устный опрос, письменный опрос, выступление на семинарах, мини-конференция.

		лизации материалов и элементов электронной техники в приборах и устройствах электроники и наноэлектроники. <i>Владеет:</i> • навыками использовать современные информационные технологии для приобретения новых знаний по физике и технике полупроводников и диэлектриков, в том числе в междисциплинарном контексте; • навыками предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач с использованием современных информационных технологий по применению полупроводниковых и диэлектрических материалов в решении инженерных задач.	
--	--	--	--

7.2. Типовые контрольные задания

7.2.1. Экзаменационные вопросы

1. В чем сущность адиабатического и одноэлектронного приближений при решении уравнения Шредингера.
2. Сущность приближений почти свободных и почти связанных электронов.
3. Что такое зона Бриллюэна. Правило построения зон Бриллюэна.
4. Закон дисперсии. Основные свойства закона дисперсии для электрона в кристалле.
5. Каковы различия в зонной структуре металлов, полупроводников и диэлектриков.
6. Эффективная масса электрона в кристалле. Ее физический смысл.
7. Связь эффективной массы с кривизной изоэнергетической поверхности, скоростью и квазиимпульсом.
8. Водородоподобные примесные центры в полупроводниках. Мелкие и глубокие уровни.
9. Каковы определения дефектов-доноров и дефектов-акцепторов.
10. Чем отличается распределение носителей заряда по состояниям в разрешенных зонах и на примесных уровнях.
11. Основные закономерности зонной структуры реальных полупроводников
12. Плотность квантовых состояний и функция распределения электронов по энергиям.
13. Статистика равновесных носителей в собственном полупроводнике.
14. Статистика равновесных носителей в полупроводнике n -типа.
15. Статистика равновесных носителей в полупроводнике p -типа.
16. Рассеяние носителей заряда на колебаниях атомов кристаллической решетки.

17. Рассеяние носителей заряда на ионизированных атомах примеси.
18. Дрейфовая подвижность носителей и ее зависимость от температуры;
19. Электропроводность собственных и примесных полупроводников.
20. Эффект Холла.
21. Изменение сопротивления в магнитном поле.
22. Неравновесные носители заряда. Уравнение непрерывности.
23. Биполярная световая генерация.
24. Монополярная световая генерация.
25. Межзонная рекомбинация неравновесных носителей.
26. Межзонная ударная рекомбинация неравновесных носителей.
27. Рекомбинация через локальные центры.
28. Поглощение света. Фундаментальные (собственные) поглощения.
29. Примесные и экситонные поглощения. Поглощение свободными носителями и решеточное.
30. Фотопроводимость.
31. Эффект Дембера и фотоэлектромагнитный эффект.
32. Квантово-размерные эффекты в тонких слоях.
33. Многоквантовые ямы и сверхрешетки.
34. Общие понятия о поляризации диэлектриков. Векторы поляризации и электрического смещения.
35. Поляризация неполярных диэлектриков
36. Дипольно-релаксационная и ионно-релаксационная поляризация диэлектриков.
37. Понятие о диэлектрических потерях. Потери сквозной проводимости.
38. Диэлектрические релаксационные потери.
39. Пьезоэлектрический эффект.
40. Пироэлектрики и электреты. Сегнетоэлектрики.

7.2.2. Контрольные вопросы к самостоятельной работе

Тема 1. Основы зонной теории полупроводников и диэлектриков

- В чем сущность адиабатического и одноэлектронного приближений при решении уравнения Шредингера.
- Как идеальная решетка воздействует на движение электрона по кристаллу.
- Сущность приближений почти свободных и почти связанных электронов. Какие основные выводы можно сделать из решения уравнения Шредингера этими методами.
- Что такое зона Бриллюэна. Правило построения зон Бриллюэна.
- Закон дисперсии. Основные свойства закона дисперсии для электрона в кристалле. Геометрическое представление закона дисперсии.
- Чем отличается энергетический спектр электронов в кристалле от спектра в изолированном атоме.
- Что такое квазиимпульс электрона.
- Каковы различия в зонной структуре металлов, полупроводников и диэлектриков.
- Эффективная масса электрона в кристалле. Ее физический смысл.
- Связь эффективной массы с кривизной изоэнергетической поверхности, скоростью и квазиимпульсом.
- Приведите и объясните эксперименты, подтверждающие существование энергетических зон в твердых телах.
- Каким экспериментом можно определить эффективные массы носителей заряда.
- Что такое водородоподобная модель примесных состояний.
- Каковы определения дефектов-доноров и дефектов-акцепторов.
- Чем отличается распределение носителей заряда по состояниям в разрешенных зонах и на примесных уровнях.

- Основные закономерности зонной структуры реальных полупроводников.

Тема 2. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках

- Какая связь между функциями $f_n(E, T)$ и $f_p(E, T)$. Найдите их вид для вырожденного и невырожденного полупроводника.
- Какие носители заряда в полупроводниках называются равновесными.
- Понятие о собственном и примесном полупроводниках.
- Дайте определение функции плотности состояний для электронов и дырок. Чему она равна в k -пространстве.
- Дайте графическую иллюстрацию выражений для концентраций электронов и дырок в случае вырожденного и невырожденного полупроводника n - и p - типа.
- Где в энергетическом спектре собственного полупроводника расположен уровень Ферми. В чем отличие уровня Ферми в полупроводниках от энергии Ферми в металлах.
- Что собой представляет энергетический спектр электронов в полупроводнике.
- В какой из половин запрещенной зоны находится уровень Ферми в полупроводниках n - и p - типов.
- Как подсчитать эффективное число состояний в зонах.
- Приведите формулу для концентрации носителей заряда в собственном полупроводнике для невырожденного и вырожденного полупроводника.
- Покажите, что в сильно вырожденном полупроводнике концентрация электронов не зависит от температуры.
- Как экспериментально найти ширину запрещенной зоны в невырожденном полупроводнике.
- Как зависит ширина запрещенной зоны от внешних факторов.
- Покажите графически температурную зависимость уровня Ферми собственного и невырожденного донорного полупроводника.
- В чем проявляется закон действующих масс в полупроводнике.
- Понятие о плотности состояний и зависимости ее от энергии для разрешенных зон и примесных уровней.
- Концентрация носителей, выраженная через уровень Ферми.
- Запишите и поясните условие электронейтральности в общем случае.
- Что учитывает фактор вырождения в функции распределения.
- Иллюстрируйте графическую температурную зависимость концентрации носителей заряда в собственном полупроводнике и в полупроводника с одним типом примеси.
- Может ли примесный полупроводник обладать собственной проводимостью.
- Каково условие вырождения полупроводника при введении в него примесей. В какой из полупроводников InAs или Ge нужно ввести большую концентрацию примеси для достижения вырождения.

Тема 3. Кинетические явления в полупроводниках.

- Понятие о подвижности носителей. Электропроводность полупроводника.
- Что такое энергия активации проводимости.
- Каков механизм действия фононов на электропроводность.
- Зависимость подвижности и электропроводности от температуры.
- Рассеяние носителей заряда в полупроводниках. Основные механизмы рассеяния.
- В чем заключается эффект Холла в твердых телах. Как отклоняются электроны и дырки.
- Что такое магнетосопротивление.
- Какую информацию можно получить из измерений эффекта Холла.

- Какие явления и эффекты приводят к повышению концентрации носителей заряда в полупроводниках в сильных электрических полях.
- Какие явления и эффекты связаны с увеличением подвижности носителей заряда в полупроводниках в сильных электрических полях.
- Что такое ударная ионизация, электростатическая ионизация, эффект Зинера.

Тема 4. Генерация и рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках

- Какое состояние носителей заряда называется неравновесным. Как можно его описать. Что такое квазиуровни Ферми.
- Каковы основные механизмы рекомбинации носителей заряда в полупроводниках.
- Какие способы генерации носителей заряда в полупроводнике вы можете назвать.
- Что такое максвелловское время релаксации и каков порядок его величины.
- Запишите уравнение непрерывности в общем виде и поясните смысл входящих в него членов.
- Какие законы рекомбинации вы знаете. Каким механизмам рекомбинации они соответствуют.
- Что такое Оже-рекомбинация.
- Что характеризует время жизни носителей заряда. Что характеризует сечение рассеяния.
- Как влияет положение уровня Ферми на время жизни носителей заряда.
- Каково влияние явления прилипания носителей на время жизни.
- Как рассчитать пространственное распределение концентрации избыточных носителей заряда в стационарных условиях.
- Как экспериментально найти энергетическое положение рекомбинационного уровня.
- Что характеризует диффузионная длина неосновных носителей заряда и как ее экспериментально найти.
- В чем состоят явления инжекции, эксклюзии, экстракции и аккумуляции носителей заряда и в чем их причина.
- Какие процессы протекают при локальном введении в полупроводник неравновесных неосновных носителей.
- Какие процессы протекают при локальном введении в полупроводник неравновесных основных носителей.
- Чем определяется направление и скорость движения пакета неравновесных носителей заряда.
- Соотношение Эйнштейна.
- Как экспериментально определить дрейфовую подвижность неосновных носителей.
- Как экспериментально определить время жизни неосновных носителей.

Тема 5. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках и диэлектриках

- Что такое фотопроводимость и от каких параметров она зависит.
- Что такое собственная и примесная фотопроводимость.
- В результате каких видов поглощения может возникнуть фотопроводимость.
- Как фотопроводимость зависит от интенсивности освещения.
- Что такое фоточувствительность и зачем вводится это понятие.
- Какие энергетические параметры полупроводника можно определить из спектральной зависимости фотопроводимости.
- Какие макроскопические параметры характеризуют взаимодействие электромагнитного излучения с веществом.
- Как связаны коэффициенты пропускания света, его поглощения и отражения.

- В чем состоит закон Бугера-Ламберта.
- Что такое спектр поглощения.
- Каков физический смысл коэффициента поглощения.
- Виды оптического поглощения в полупроводниках.
- Как проявляют себя фононы в явлении поглощения света твердыми телами.
- В чем состоит физический смысл прямозонных и непрямозонных электронных переходов в энергетическом спектре полупроводников.
- Форма края собственного поглощения при прямых переходах.
- Что такое экситон.
- Форма края собственного поглощения при непрямых переходах.
- Какую информацию можно получить из исследований спектров собственного поглощения.
- Какую информацию можно получить из исследований спектров примесного поглощения.
- Что такое люминесценция. Какие механизмы излучательной рекомбинации вы знаете.

Тема 6. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки.

- Квантовое ограничение. Квантовые ямы (колодцы), проволоки и точки.
- Сверхрешетки.
- Туннелирование сквозь потенциальный барьер.
- Баллистический транспорт носителей заряда.
- Спиновые эффекты.
- Электронно-оптические эффекты.
- Квантовые наноструктуры.

Тема 7. Поляризация и электропроводность диэлектриков. Диэлектрические потери.

- Что такое поляризация диэлектрика. Механизмы поляризации.
- В чем заключается электронная, ионная и ориентационная механизмы поляризации.
- В каких диэлектриках имеет место ориентационная поляризация.
- Формула Клазиуса-Мосотти.
- Что такое угол диэлектрических потерь.
- Понятие о комплексной диэлектрической проницаемости.
- В чем заключается основная роль применения эквивалентных схем.
- Характеристика тепловых видов поляризации.
- В чем состоит физическая сущность диэлектрических потерь.
- Какие явления называют прямым и обратным пьезоэффектом.
- Дайте определение пироэффекта. Какие кристаллы относятся к пироэлектрикам.
- Чем отличаются сегнетоэлектрики от линейных пироэлектриков.
- Объясните механизм пироэффекта в простой модели однородного полярного кристалла.
- Чем обусловлены первичный и вторичный пироэффекты.
- Назовите отличительные особенности сегнетоэлектриков.
- Объясните механизм формирования петель гистерезиса. Какие параметры сегнетоэлектрика по ней можно определить.
- Доменная структура сегнетоэлектриков.
- Что такое электреты.

7.2.3. Примеры текстовых заданий для промежуточного контроля

1. **Какое из приведенных выражений соответствует функции распределения Ферми- Дирака для электронов (μ - химический потенциал)**

$$1) f = \left(e^{\frac{\mu - E}{k_0 T}} + 1 \right)^{-1} \quad 2) f = \left(e^{\frac{E - \mu}{k_0 T}} + 1 \right)^{-1} \quad 3) f = A e^{\frac{E - \mu}{k_0 T}} \quad 4) f = \left(e^{\frac{E - \mu}{k_0 T}} - 1 \right)^{-1} \quad 5) f = \left(e^{\frac{\mu - E}{k_0 T}} + 1 \right)^{-1}$$

2. **Вероятность заполнения электронами при комнатной температуре энергетического уровня, лежащего на 0.1 эВ выше уровня Ферми, равна:**

$$1) 0,1 \quad 2) 1,8 \cdot 10^{-2} \quad 3) 1,5 \cdot 10^{-3} \quad 4) 0,5 \cdot 10^{-4} \quad 5) 0,8 \cdot 10^{-5}.$$

3. **Какое из следующих выражений является наиболее общим решением одно-электронного уравнения Шредингера с периодическим потенциалом:**

$$1) \psi_k(r) = C e^{ikr}, \text{ где } C - \text{ постоянная} \quad 2) \varepsilon(k) = \frac{\int \psi_k^* \hat{H} \psi_k dr}{\int \psi_k^* \psi_k dr} \quad 3) \varepsilon_k = \frac{\hbar^2}{2m^*} k^2$$

$$4) \psi_k(r) = u_k(r) e^{ikr} \quad 5) \varepsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{\frac{2}{3}}$$

4. **Для электронов, располагающихся вблизи максимумов энергетической зоны, эффективная масса:**

1) обращается в нуль 2) положительна 3) обращается в бесконечность 4) отрицательна 5) равна массе свободного электрона.

5. **В соответствии с зонной теорией твердые тела относятся к полупроводникам, если:**

1) последняя зона, в которой есть электроны, заполнена частично
2) валентная зона заполнена электронами полностью, но она перекрывается со следующей разрешенной зоной, не занятой электронами
3) валентная зона заполнена электронами полностью и отделена от следующей за ней свободной зоны широкой (> 5-6 эВ) запрещенной зоной
4) валентная зона заполнена электронами полностью и отделена от следующей за ней свободной зоны широкой (> 2-3 эВ) запрещенной зоной
5) валентная зона заполнена электронами полностью и отделена от следующей за ней свободной зоны узкой (< 2-3 эВ) запрещенной зоной

6. **Эффективные массы носителей заряда можно определить из экспериментов по:**

1) циклотронному резонансу
2) температурной зависимости электропроводности
3) температурной зависимости подвижности
4) эффекту Холла
5) термомагнитным явлениям.

7. **Область значений волнового вектора k , в пределах которой энергия $E(k)$ электрона испытывает полный цикл своего изменения, называют:**

1) зоной Бриллюэна 2) запрещенной зоной 3) валентной зоной
4) зоной проводимости 5) энергетической щелью.

8. *Согласно приближению сильно связанных электронов, причиной расщепления атомных уровней в энергетические зоны при сближении атомов является:*
- 1) дифракция валентных электронов на границах зон Бриллюэна
 - 2) перекрытие атомных волновых функций
 - 3) эффективное электрон-фонон-электронное взаимодействие, приводящее к образованию связанных электронных пар
 - 4) рассеяние электронов на фононах и дефектах кристаллической решетки
 - 5) принцип запрета Паули.
9. *Знание компонент m_{ij}^* тензора эффективной массы позволяет описать движение электрона в кристалле как движение свободной частицы с массой m_{ij}^* :*
- 1) только во внешних электрических полях
 - 2) только во внешних магнитных полях
 - 3) в одном только электрическом поле решетки
 - 4) во внешних электрических и магнитных полях
 - 5) во внешних полях при одновременном действии периодического поля решетки
10. *Какое из следующих утверждений верно:*
- А) вырождение примесного полупроводника наступает тем раньше, чем больше концентрация свободных носителей заряда.
- В) вырождение примесного полупроводника наступает тем раньше, чем ниже температура (при данной концентрации) и чем меньше эффективная масса носителей заряда.
- 1) верно только А
 - 2) верно только В
 - 3) верны оба утверждения
 - 4) оба утверждения неверны.
11. *Концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике:*
- 1) зависит от положения уровня Ферми и растет с ростом температуры по экспоненциальному закону
 - 2) не зависит от положения уровня Ферми и растет с ростом температуры по экспоненциальному закону
 - 3) зависит от положения уровня Ферми и уменьшается с ростом температуры по экспоненциальному закону
 - 4) не зависит от положения уровня Ферми и уменьшается с ростом температуры по экспоненциальному закону
 - 5) не зависит от положения уровня Ферми и растет с ростом температуры по линейному закону
12. *Удельное сопротивление монокристалла кремния р-типа при комнатной температуре (300 К) составляет $9 \cdot 10^{-4}$ Ом.м. Определите коэффициент Холла, если подвижность дырок $0,04 \text{ м}^2/(\text{В.с})$.*
- 1) $3,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Кл}$
 - 2) $2,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{Кл}$
 - 3) $3,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$
 - 4) $4,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл}$
 - 5) $7,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Кл}$

13. Явление, заключающееся в возникновении в полупроводнике при приложении сильного постоянного электрического поля колебаний тока с частотой порядка 10^{10} Гц, называют:

- 1) эффектом Холла 2) фотоэлектрическим эффектом 3) эффектом Ганна
- 4) эффектом Пельте 5) циклотронным резонансом

14. Дырочный полупроводник невырожден, если:

- 1) уровень Ферми лежит в валентной зоне ниже потолка валентной зоны на $5 kT$
- 2) уровень Ферми расположен в зоне проводимости выше дна зоны проводимости по крайней мере на $5 kT$
- 3) уровень Ферми лежит в запрещенной зоне ниже дна зоны проводимости не менее чем на kT
- 4) уровень Ферми лежит в запрещенной зоне выше потолка валентной зоны не менее чем на kT
- 5) уровень Ферми лежит в середине запрещенной зоны.

15. Основным методом измерения концентрации носителей и определении их знака в случае примесной проводимости является:

- 1) эффект Холла 2) измерение термо эдс 3) измерения проводимости и подвижности носителей 4) измерения температурной зависимости примесной проводимости 5) измерения красной границы фотопроводимости

16. Какое из следующих утверждений верно:

- А. вырождение примесного полупроводника наступает тем раньше, чем больше концентрация свободных носителей заряда.
- В. вырождение примесного полупроводника наступает тем раньше, чем ниже температура (при данной концентрации) и чем меньше эффективная масса носителей заряда.
- 1) Верны оба утверждения 2) Оба утверждения неверны
- 3) Верно только А 4) Верно только В

17. Рекомбинация носителей заряда в полупроводниках называется экситонной, если электрон:

- 1) переходит непосредственно из зоны проводимости в валентную зону
- 2) прежде захватывается некоторым локальным центром, затем переходит в валентную зону и рекомбинирует с дыркой
- 3) и дырка захватываются соответствующими рекомбинационными центрами, а затем происходит рекомбинация посредством перехода электрона на локальный уровень дырки
- 4) переходит из зоны проводимости на мелкий уровень донора и нейтрализует ионизованный донор
- 5) образующий с дыркой связанную квазичастицу с нулевым спином, рекомбинирует с дыркой.

18. Подвижность дырок в монокристалле кремния при комнатной температуре (300 К) равна $0,04 \text{ м}^2/(\text{В.с})$. Коэффициент диффузии дырок при этой температуре:

- 1) $41,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ 2) $4,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ 3) $10,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ 4) $10,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$
- 5) $41,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$

19. Эффектом Дембера называют:

- 1) явление возникновения в освещенном полупроводнике вследствие различия в коэффициентах диффузии электронов и дырок объемный ЭДС
- 2) процесс эмиссии электронов из полупроводника под действием излучения
- 3) явление, заключающееся в возникновении в полупроводнике при приложении сильного постоянного электрического поля колебаний тока с частотой порядка 10^{10} Гц
- 4) изменение электрического сопротивления полупроводника под действием излучения
- 5) явление возникновения в полупроводнике с текущим по нему током поперечного электрического поля под действием магнитного поля.

20. Рекомбинацией называется любой процесс, приводящий к переходу электрона:

- 1) в зону проводимости
- 2) из зоны проводимости в состояние, локализованное вблизи примеси или дефекта
- 3) с примесного уровня в незанятое электронами состояние в валентной зоне
- 4) на более высокие уровни энергии (в зону проводимости или запрещенную зону)
- 5) из зоны проводимости в валентную зону с заполнением какого-либо дырочного состояния, в результате чего происходит исчезновение электрона и дырки

21. Эффектом поля называют:

- 1) явление разогрева электронно-дырочного газа в сильных электрических полях
- 2) явление ударной ионизации в сильном электрическом поле, в результате чего возникают электронно-дырочные пары.
- 3) явление наклона энергетических зон у полупроводника, находящегося во внешнем электрическом поле
- 4) явление увеличения концентрации свободных носителей заряда вследствие уменьшения энергии ионизации атомов донорной примеси в сильном электрическом поле
- 5) явление изменения проводимости полупроводника под действием электрического поля, нормального к его поверхности.

22. Какое из следующих выражений является уравнением непрерывности для электронов в полупроводнике.

- 1) $\frac{\mu_n}{D_n} = \frac{e}{kT}$
- 2) $\frac{\partial n}{\partial t} = G - \frac{\partial n}{\partial x} \frac{n - n_0}{\tau_n}$
- 3) $J_n = en\mu_n E + eD_n \frac{dn}{dx}$
- 4) $n = N_e \exp \frac{E_c - E_F}{kT}$
- 5) $n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp \frac{E_c - E_v}{2kT}$

23. Что такое демаркационный уровень?

- 1) энергетический уровень ловушки, для которого вероятность рекомбинации выше, чем для теплового освобождения носителя заряда
- 2) энергетический уровень ловушки, для которого вероятность теплового освобождения носителя заряда выше, чем вероятность рекомбинации
- 3) энергетический уровень ловушки, для которого вероятность рекомбинации и теплового освобождения носителя заряда одинакова
- 4) центр рекомбинации
- 5) уровень прилипания

24. Вычислить диффузионную длину электронов в невырожденном Ge при 300 K, если время жизни электронов составляет $\tau_n=10^{-4}$ с, $\mu_n=3800$ см²/Вс. ($k_0 = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

- 1) 0,2 см 2) 0,01 см 3) 0,02 см 4) 0,2 см 5) 0,1 см

25. Люминесценция отличается от других видов неравновесного излучения только:

- 1) спектральным составом 2) интенсивностью 3) поляризацией
4) когерентностью 5) длительностью послесвечения.

26. Систему из электрона и дырки, связанных друг с другом благодаря взаимному кулоновскому притяжению, называют:

- 1) донорно-акцепторной парой 2) экситоном 3) поляроном
4) куперовской парой 5) электрическим доменом.

7.3. Методические материалы, определяющие процедуру оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций.

Общий результат выводится как интегральная оценка, складывающаяся из текущего контроля – 60 % и промежуточного контроля – 50 %.

Текущий контроль по дисциплине включает:

- посещение занятий - 10 баллов, 5- участие на практических занятиях - 15 баллов,
- выполнение лабораторных заданий – 25 баллов,
- выполнение домашних (аудиторных) контрольных работ - 10 баллов.

Промежуточный контроль по дисциплине включает:

- устный опрос - 5 баллов,
- письменная контрольная работа - 15 баллов,
- тестирование - 20 баллов.

8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины.

Основная

1. Шалимова К. В. Физика полупроводников. М.: Лань, 2010. – (62 экз.).
2. Орешкин П.П. Физика полупроводников и диэлектриков : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по специальности "Полупроводники и диэлектрики. М. : Высшая школа, 1977. - 448 с. (17 экз.).
3. Бонч-Бруевич В. Л., Физика полупроводников / Бонч-Бруевич В. Л., С.Г. Калашников. - Москва : Наука, 1977. - 671 с. : ил. ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=483346> (18.06. 2018).

Дополнительная

4. Зегря Г.Г., Перель В.И. Основы физики полупроводников. М. : Физматлит, 2009. - 335 с. (20 экз.).
5. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М., Наука 2-е издание. 1990 г, 688 с. – (5 экз.).
6. Гольдаде, В.А. Физика конденсированного состояния : пособие / В.А. Гольдаде, Л.С. Пинчук ; ред. Н.К. Мышкина. - Минск : Белорусская наука, 2009. - 648 с. ; То

же [Электронный ресурс]. -

URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309> (06.06.2018).

7. Гуртов, В.А. **Физика** твердого тела для инженеров : учебное пособие / В.А. Гуртов, Р.Н. Осауленко ; науч. ред. Л.А. Алешина. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Техносфера, 2012. - 560 с. - (Мир физики и техники). - ISBN 978-5-94836-327-1 ; То же [Электронный ресурс]. -

URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233466> (03.06.2018).

9. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

1. ЭБС IPRbooks: <http://www.iprbookshop.ru/>
2. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека онлайн» www.biblioclub.ru.
3. Электронной библиотека на <http://elibrary.ru>.
4. Электронный каталог НБ ДГУ [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о всех видах лит, поступающих в фонд НБ ДГУ/Дагестанский гос. ун-т. – Махачкала, 2010 – Режим доступа: <http://elib.dgu.ru>.
5. Moodle [Электронный ресурс]: система виртуального обучения: [база данных] / Даг. гос. ун-т. – Махачкала, г. – Доступ из сети ДГУ или, после регистрации из сети ун-та, из любой точки, имеющей доступ в интернет. – URL: <http://moodle.dgu.ru/>
6. Федеральное хранилище «Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов» <http://school-collection.edu.ru>.
7. Сайт образовательных ресурсов Даггосуниверситета <http://edu.icc.dgu.ru>
8. <http://www.phys.msu.ru/rus/library/resources-online/> - электронные учебные пособия, изданные преподавателями физического факультета МГУ.
9. <http://www.phys.spbu.ru/library/> - электронные учебные пособия, изданные преподавателями физического факультета Санкт-Петербургского госуниверситета.
10. **Springer**. <http://link.springer.com>, <http://materials.springer.com/>
11. **Scopus**: <https://www.scopus.com>
12. **Web of Science**: webofknowledge.com

10. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины.

Студент в процессе обучения должен не только освоить учебную программу, но и приобрести навыки самостоятельной работы. Студент должен уметь планировать и выполнять свою работу. Удельный вес самостоятельной работы составляет по времени 30% от всего времени изучаемого цикла. Это отражено в учебных планах и графиках учебного процесса, с которым каждый студент может ознакомиться у преподавателя дисциплины.

Главное в период обучения своей специальности - это научиться методам самостоятельного умственного труда, сознательно развивать свои творческие способности и овладевать навыками творческой работы. Для этого необходимо строго соблюдать дисциплину учебы и поведения.

Каждому студенту следует составлять еженедельный и семестровый планы работы, а также план на каждый рабочий день. С вечера всегда надо распределять работу на завтра. В конце каждого дня целесообразно подводить итог работы: тщательно проверить, все ли выполнено по намеченному плану, не было ли каких-либо отступлений, а если были, по какой причине это произошло. Нужно осуществлять самоконтроль, который является необходимым условием успешной учебы. Если что-то осталось невыполненным, необходимо изыскать время для завершения этой части работы, не уменьшая объема недельного плана.

Вид учебных занятий	Организация деятельности студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; пометить важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначить вопросы, термины, материал, который вызывает трудности, пометить и попытаться найти ответ в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на консультации, на практических работах.
Практические занятия	Проработка рабочей программы, уделяя особое внимание целям и задачам структуре и содержанию дисциплины. Конспектирование источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы, работа с текстом. Решение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму и др.
Реферат	Поиск литературы и составление библиографии, использование от 3 до 5 научных работ, изложение мнения авторов и своего суждения по выбранному вопросу; изложение основных аспектов проблемы. Кроме того, приветствуется поиск информации по теме реферата в Интернете, но с обязательной ссылкой на источник, и подразумевается не простая компиляция материала, а самостоятельная, творческая, аналитическая работа, с выражением собственного мнения по рассматриваемой теме и грамотно сделанными выводами и заключением. Ознакомиться со структурой и оформлением реферата.
Подготовка к зачету	При подготовке к зачету необходимо ориентироваться на конспекты лекций, рекомендуемую литературу и др.

11. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем.

Чтение лекций с использованием мультимедийных презентаций. Использование анимированных интерактивных компьютерных демонстраций и практикумов-тренингов по ряду разделов дисциплины.

12. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Материально – техническая база кафедры экспериментальной физики, которая осуществляет подготовку по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника», позволяет готовить магистров, отвечающих требованиям ФГОС. На кафедре имеются 3 учебных и 5 научных лабораторий, оснащенных современной технологической, измерительной и диагностической аппаратурой; в том числе функционирует проблемная НИЛ «Твердотельная электроника». Функционируют специализированные учебные и научные лаборатории: Физика и технология керамических материалов для твердотельной электроники, Физика и технология тонкопленочных структур, Электрически активные диэлектрики в электронике, Физическая химия полупроводников и диэлектриков.

Лекционные занятия проводятся в аудитории, оснащенной мультимедийным проекционным оборудованием и интерактивной доской.