

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им.
Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО

решением ученого совета ННГУ

протокол от

«31» мая 2023 г. № 6

Рабочая программа дисциплины (модуля)

Введение в физику полупроводников

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

бакалавриат

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.03.03 Радиофизика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

Радиофизика и электроника

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

бакалавр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород

2023 год

1. Место и цели дисциплины (модуля) в структуре ОПОП

Дисциплина «Введение в физику полупроводников» относится к дисциплинам по выбору вариативной части (блок Б1.В.ДВ1) основной профессиональной образовательной программы (ОПОП) высшего образования по направлению подготовки 03.03.03 «Радиофизика» на радиофизическом факультете ННГУ. Дисциплина преподаётся в 6-м семестре.

Целями освоения дисциплины являются:

- дать начальные знания о физике твердого тела и основных принципах функционирования полупроводниковых приборов, сформировать представление о методиках применения радиотехнических изменений для определения параметров полупроводниковых приборов и свойств материалов, из которых эти приборы изготовлены;
- научить рассматривать процессы, происходящие в полупроводниках, и осваивать практические навыки измерений и обработки параметров полупроводниковых приборов.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции* (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине**	
ПК-1. Способен осваивать принципы работы и методы эксплуатации современной и перспективной радиоэлектронной, оптической и акустической аппаратуры	ПК-1.1. Применяет теоретические основы создания и принципы функционирования радиоэлектронной, оптической и акустической аппаратуры ПК-1.2. Осваивает новые технологии радиоэлектронной, оптической и акустической аппаратуры, используя специальную, научную и учебную литературу	Знать современное состояние полупроводниковой электроники в области радиофизики. Уметь решать стандартные задачи физики полупроводников в с применением информационно - коммуникационных технологий. Владеть современными информационными и коммуникационными технологиями сбора теоретических и	Задача, собеседование

		эмпирических данных, их анализа и представления полученных результатов исследования.	
ПК-2. Способен осваивать и применять современные и перспективные методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в области радиофизики	<p>ПК-2.1. Анализирует современное состояние исследований в области физики и радиофизики, современные подходы к описанию и моделированию различных физических явлений и оценке полученных результатов.</p> <p>ПК-2.2. Выбирает и применяет аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы исследования в соответствии с типом поставленной задачи.</p> <p>ПК-2.3. Анализирует полученные данные, формулирует выводы и рекомендации в ходе планирования, подготовки, проведения НИР в области радиофизики.</p>	<p>Знать методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.</p> <p>У1 (ОПК-2) Уметь при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений.</p> <p>В1 (ОПК-2) Владеть навыками самостоятельной постановки, критического переосмысления и решения новых задач в области радиофизики.</p>	Задача, собеседование

3. Структура и содержание дисциплины (модуля)

Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 33 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (0 часов занятия лекционного типа, 32 часа занятия семинарского типа (семинары, научно-практические занятия, лабораторные работы и т.п.), 0 часов групповые консультации, 0 часов индивидуальные консультации, 0 часов мероприятия текущего контроля успеваемости, 1 час мероприятия промежуточной аттестации), 75 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Содержание дисциплины (модуля)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)			В том числе																
				Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них														Самостоятельная работа обучающегося, часы		
				Занятия лекционного типа			Занятия семинарского типа			Занятия лабораторного типа			Консультации		Всего					
	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная		
1. Введение. Кристаллическая структура твердого тела	10					4								4		6				
2. Колебания и волны в кристаллической решетке. Электроны в периодическом потенциале	10					4								4		6				
3. Статистика носителей заряда, Квазиклассическое описание движения носителей заряда	10					4								4		6				
4. Неравновесные явления в полупроводниках. Процессы переноса в неоднородных полупроводниках.	12					4								4		8				
5. Теория р-п перехода, устройства на базе диода	12					4								4		8				
6. Биполярный транзистор. Работа биполярных	12					4								4		8				

транзисторов в схемах																				
7. Явления на резкой границе раздела материалов	12					4								4			8			
8. Полевой транзистор с р-п переходом и барьером Шоттки, полевой транзистор металл-диэлектрик-полупроводник, полевой транзистор металл-окисел-полупроводник	17					2								2			15			
9. Оптоэлектронные приборы.	12					2								2			10			
Промежуточная аттестация: зачет																				

4. Образовательные технологии

В соответствии с рабочей программой и тематическим планом изучение дисциплины проходит в виде аудиторной и самостоятельной работы студентов. Учебный процесс в аудитории осуществляется в форме практических занятий.

Образовательные технологии, способствующие формированию компетенций используемые на занятиях практического типа:

- проблемное изложение учебного материала.
- регламентированная самостоятельная деятельность студентов;
- решение проблемных ситуаций для реализации технологии коллективной мыслительной деятельности.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

5.1. Темы занятий, по которым дается домашнее задание

1. Особенности кристаллической структуры твердых тел.
2. Причины возникновения зонной структуры твердых тел. Эффективная масса электронов и дырок
3. Типы твердых тел: металлы, диэлектрики, полупроводники. Уровень Ферми. Собственная и примесная проводимость. Основные и неосновные носители заряда.
4. Акустические и оптические фононы. Продольные и поперечные колебания. Законы дисперсии для трехмерной решетки.
5. Кинетическое уравнение Больцмана и механизмы рассеяния электронов. Подвижность носителей заряда.
6. р-п переход в состояние равновесия и под внешним напряжением. Вольт-амперные характеристики перехода.
7. Контакт металл-полупроводник. Гетеропереход.
8. Принципы работы биполярного и гетробиполярного транзисторов.
9. Биполярный и гетробиполярный транзисторы.
10. Принципы работы полевого транзистора с управляющим переходом, барьером

Шоттки, МДП затвором. Гетерополевые транзисторы.

11. Отличие принципов работы туннельного диода, лавинно-пролетного диода и генератора Ганна.

12. Принципы работы фильтров на поверхностных акустических волнах.

Выполнение домашних заданий проверяется на занятиях. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы – основная и дополнительная литература.

5.2 Вопросы, которые должны быть проработаны в ходе самостоятельной работы

1. Разогрев электронного газа в полупроводниках. Время релаксации импульса и энергии

2. Фотоионизация и фотопроводимость. Механизмы рекомбинации носителей.

3. Диффузионный и дрейфовый ток. Соотношения Эйнштейна. Система уравнений для описания потенциалов, полей и токов. Время жизни и диффузионная длина неосновных носителей заряда.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), включающий:

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования.

ОПК-2: способность самостоятельно приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
Знания Знать методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических	Отсутствие знаний материала	Наличие грубых ошибок в основном материале	Знание основного материала с рядом негрубых ошибок	Знание основного материала с рядом заметных погрешностей	Знание основного материала с незначительными погрешностями	Знание основного материала без ошибок и погрешностей	Знание основного и дополнительного материала без ошибок и погрешностей

ских задач, в том числе в междисциплинарных областях.							
<u>Умения</u> Уметь при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операции нализации и исходя из наличных ресурсов и ограничений.	Отсутствует умение при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операции нализации и исходя из наличных ресурсов и ограничений.	Наличие грубых ошибок при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи.	Способность решить исследовательские и практические задачи, генерировать новые идеи, поддающиеся операции нализации и исходя из наличных ресурсов и ограничений с существенными ошибками	Способность решить исследовательские и практические задачи, генерировать новые идеи, поддающиеся операции нализации и исходя из наличных ресурсов и ограничений с незначительными погрешностями	Способность решить исследовательские и практические задачи, генерировать новые идеи, поддающиеся операции нализации и исходя из наличных ресурсов и ограничений почти без ошибок и погрешностей	Способность решить исследовательские и практические задачи, генерировать новые идеи, исходя из наличных ресурсов и ограничений	Способность решить исследовательские и практические задачи, генерировать новые идеи и для других широко используемых приборов в полупроводниковой электронике
<u>Навыки</u> Владеть навыками самостоятельной постановки, критического переосмысления и решения	Полное отсутствие навыка	Отсутствие навыка	Владение навыком в минимальном объеме	Посредственное владение навыком	Достаточное владение навыком	Хорошее владение навыком	Всестороннее владение навыком

новых задач в области радиофизики.							
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

ПК-1 способность понимать принципы работы и методы эксплуатации современной радиоэлектронной и оптической аппаратуры и оборудования

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания</u> Знать современное состояние полупроводниковой электроники в области радиофизики.	Отсутствие знаний материала	Наличие грубых ошибок в основном материале	Знание основного материала с рядом негрубых ошибок	Знание основного материала с рядом заметных погрешностей	Знание основного материала с незначительными погрешностями	Знание основного материала без ошибок и погрешностей	Знание основного и дополнительного материала без ошибок и погрешностей
<u>Умения</u> Уметь решать стандартные задачи физики полупроводников с применением информационно-коммуникационных	Отсутствует способность решать стандартные задачи физики полупроводников с применением информационно-коммуникационных	Наличие грубых ошибок при решении стандартных задач физики полупроводников с применением информационно-коммуникационных	Способность решать стандартные задачи физики полупроводников с применением информационно-коммуникационных технологий	Способность решать стандартные задачи физики полупроводников с применением информационно-коммуникационных технологий	Способность решать стандартные задачи физики полупроводников с применением информационно-коммуникационных технологий.	Способность решать стандартные задачи физики полупроводников с применением информационно-коммуникационных технологий.	Способность решать стандартные и сложные задачи физики полупроводников с применением информационно-коммуникационных технологий.

х технологий.	технологий.	ционно-коммуникационных технологий.	й с существенными ошибками	й с незначительными погрешностями	кационных технологий почти без ошибок и погрешностей		ционно-коммуникационных технологий
<u>Навыки</u> Владеть современными информационными и коммуникационными технологиями сбора теоретических и эмпирических данных, их анализа и представления полученных результатов исследования.	Полное отсутствие навыка	Отсутствие навыка	Владение навыком в минимальном объеме	Посредственное владение навыком	Достаточное владение навыком	Хорошее владение навыком	Всестороннее владение навыком
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

6.2. Описание шкал оценивания.

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде **зачета с оценкой**, на котором определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала
- способности студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Зачет проводится в устной форме и заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ. Практическая часть предусматривает решение задачи.

Критерии оценок.

Оценка	Уровень подготовки
Превосходно	Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом, студент демонстрирует творческий подход к решению нестандартных ситуаций. Студент дал полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета, подтверждая теоретический материал практическими примерами. Студент активно работал на занятиях. 100 %-ное выполнение контрольных заданий
Отлично	Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Студент дал полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета, подтверждает теоретический материал практическими примерами. Студент активно работал на занятиях. Выполнение контрольных заданий на 90% и выше
Очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент дает ответ на все теоретические вопросы билета при наличии неточностей. Студент активно работал на занятиях. Выполнение контрольных заданий от 80 до 90%.
Хорошо	В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Студент дает полный ответ на все теоретические вопросы билета при наличии неточностей. Допускаются ошибки при ответах на дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора. Студент работал на занятиях.

	Выполнение контрольных заданий от 70 до 80%.
Удовлетворительно	<p>Минимально достаточный уровень подготовки. Студент показывает минимальный уровень теоретических знаний, делает существенные ошибки, но при ответах на наводящие вопросы, может правильно сориентироваться и в общих чертах дать правильный ответ. Студент посещал занятия.</p> <p>Выполнение контрольных заданий от 50 до 70%.</p>
Неудовлетворительно	<p>Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Студент дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора.</p> <p>Выполнение контрольных заданий до 50%.</p>
Плохо	<p>Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы.</p> <p>Выполнение контрольных заданий менее 20 %.</p>

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- устные и письменные ответы на вопросы.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и навыков используются следующие процедуры и технологии:

- практические контрольные задания, включающие одну или несколько задач

Для проведения итогового контроля сформированности компетенции используются: устный опрос, решение практических задач.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

Вопросы для оценки сформированности компетенций ПК-1, ПК-2

1. Особенности кристаллической структуры твердых тел.
2. Причины возникновения зонной структуры твердых тел. Эффективная масса электронов и дырок
3. Типы твердых тел: металлы, диэлектрики, полупроводники. Уровень Ферми. Собственная и примесная проводимость. Основные и неосновные носители заряда.
4. Акустические и оптические фононы. Продольные и поперечные колебания. Законы дисперсии для трехмерной решетки.

5. Кинетическое уравнение Больцмана и механизмы рассеяния электронов. Подвижность носителей заряда.
6. Разогрев электронного газа в полупроводниках. Время релаксации импульса и энергии
7. Фотоионизация и фотопроводимость. Механизмы рекомбинации носителей.
8. Диффузионный и дрейфовый ток. Соотношения Эйнштейна. Система уравнений для описания потенциалов, полей и токов. Время жизни и диффузионная длина неосновных носителей заряда.
9. p-n переход в состоянии равновесия и под внешним напряжением. Вольт-амперные характеристики перехода.
10. Контакт металл-полупроводник. Гетеропереход.
11. Принципы работы биполярного и гетеробиполярного транзисторов.
12. Биполярный и гетеробиполярный транзисторы.
13. Принципы работы полевого транзистора с управляющим переходом, барьером Шоттки, МДП затвором. Гетерополевые транзисторы.
14. Отличие принципов работы туннельного диода, лавинно-пролетного диода и генератора Ганна.
15. Принципы работы фильтров на поверхностных акустических волнах.

Типовые задачи для оценивания сформированности умений и навыков по компетенциям ПК-1, ПК-2

1. Вывести дисперсионную характеристику для акустических фононов в полупроводниковых кристаллах. Качественно объяснить причины возникновения оптических фононов в сложных кристаллических решетках.
2. Вывести соотношение Эйнштейна $D = \frac{\mu k_B T}{e}$, связывающее коэффициент диффузии и подвижность μ .
3. Вывести закон Дебая и рассчитать теплоемкость кремния и германия при температуре большей, чем температура Дебая и при 0 К. Температура Дебая для кремния равна 658 К, для германия – 366 К. Оценить температуру поверхности кремниевого кристалла мощного полупроводникового прибора если известны: рассеиваемая прибором мощность - 150 Вт, толщина кристалла - 50 мкм. Считать, что кристалл припаян к идеальному теплоотводу. Паразитным тепловым сопротивлением припоя пренебречь.
4. Рассчитать длину волны электрона в германии исходя из тепловой энергии W_t и эффективной массы m^* .
5. Объяснить распределение концентрации электронов, наличие электрического поля и потенциального барьера на границе p⁺-n перехода. Используя условия равновесия в такой системе вывести соотношение Эйнштейна. Объяснить физический смысл теплового потенциала как коэффициента пропорциональности между подвижностью и коэффициентом диффузии. Найти диффузионную длину электронов в невырожденном германии при температуре $T = 300$ К, если время жизни электронов составляет $\tau_n = 10^{-4}$ с, а их подвижность - $\mu_n = 3800$ см²/В·с.
6. При $T = 300$ К удельное сопротивление образца собственного кремния составляет $2.3 \cdot 10^5$ Ом·см. Какова концентрация собственных носителей заряда? Если через образец пропустить ток, то какая его часть будет обусловлена электронами? Считать, что $\mu_n = 1900$ см²/В·с; $\mu_p = 425$ см²/В·с.
7. Удельное сопротивление собственного германия при 27°C равно 0,47 Ом·м. Вычислить концентрацию электронов и дырок.
8. Оценить среднюю скорость теплового движения электронов при комнатной температуре и дрейфовую скорость электронов на участке насыщения зависимости дрейфовой скорости от напряженности электрического поля в Si, если эффективная масса электронов в данном материале составляет $m^* = 0.5m_0$, а энергия оптического фонона $\hbar\omega_0 = 60$ мэВ.

9. Оценить величину плотности тока тепловой генерации p - n перехода, если концентрации примесей в p и n областях составляют, соответственно, $N_A=2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_D=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Подвижности дырок и электронов $\mu_p=1900 \text{ см}^2/\text{Вс}$, $\mu_n=3500 \text{ см}^2/\text{Вс}$. Времена жизни носителей заряда $\tau_p=\tau_n=10^{-3} \text{ с}$. Концентрация носителей в собственном полупроводнике $n_i=2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Найти величину тока в p - n переходе при внешнем напряжении $V=+0,15 \text{ В}$; $-0,5 \text{ В}$; -2 В . Площадь перехода составляет 1 мм^2 .
10. Рассчитать контактную разность потенциалов в Ge p - n переходе. Удельное сопротивление p и n областей $\rho=2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Как изменится высота энергетического барьера при изменении напряжения с $V=+0,15 \text{ В}$ до $V=-5 \text{ В}$? Нарисовать зонные диаграммы. Концентрация носителей в собственном полупроводнике $n_i=2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Изменится ли (и если изменится, то как) контактная разность потенциалов при нагреве полупроводниковой структуры?
11. Электроны вырываются из металла и притягиваются к положительному заряду, индуцированному на поверхности металла, образуя некоторое распределение поверхностного заряда вблизи поверхности металла. Считая плотность электронов в этой области достаточно малой, определить плотность электронов $n(x)$ на расстоянии x от поверхности.
12. Определить ширину p - n перехода в кремнии при температуре 350 К в отсутствии внешнего напряжения, если концентрация дырок и электронов соответственно $1,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ и $2,0 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$.

6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утверждённое приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 г. №55-ОД,

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

а) основная литература:

1. Шалимова К. В. - Физика полупроводников: [учеб. для вузов по специальности «Полупроводниковые и микроэлектрон. Приборы»]. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 391 с.
2. Киттель Ч. «Элементарная физика твердого тела» Наука М. 1965

б) дополнительная литература:

1. Киреев П. С. – «Физика полупроводников» [учеб. пособие для втузов]. - М.: Высшая школа, 1975. - 584 с.
2. Ансельм А. И. – «Введение в теорию полупроводников» [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - М. : Наука, 1978. - 615 с.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Лекционный зал, аудитории для практических занятий в группах.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО/ВО с учетом рекомендаций и ОПОП ВПО по направлению (профилю), специальности (специализации) Радиофизика

Автор Тарасова Е.А.

Рецензент Осипов Г.В.

Заведующий кафедрой Бельков С.А.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от «25» мая 2023 года, протокол № 04/23.