

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

УТВЕРЖДЕНО

решением Ученого совета ННГУ

протокол № 8 от 24.09.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Введение в физику полупроводников

Уровень высшего образования

Бакалавриат

Направление подготовки / специальность

03.03.03 - Радиофизика

Направленность образовательной программы

Радиофизика и электроника

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.01.03 Введение в физику полупроводников относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

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	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
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	ПК-1.1: Знать современное состояние полупроводниковой электроники в области радиофизики. Уметь решать стандартные задачи физики полупроводников с применением информационно-коммуникационных технологий. ПК-1.2: Владеть современными информационными и коммуникационными технологиями сбора теоретических и эмпирических данных, их анализа и представления полученных результатов исследования.	Собеседование	Зачёт: Контрольные вопросы Тест Задачи
ПК-2: Способен осваивать и применять современные и перспективные методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в области радиофизики	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 ПК-2.2: Выбирает и применяет аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы	ПК-2.1: 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. ПК-2.2:	Тест Собеседование	Зачёт: Контрольные вопросы Тест Задачи

	исследования в соответствии с типом поставленной задачи ПК-2.3: Анализирует полученные данные, формулирует выводы и рекомендации. в ходе планирования, подготовки, проведения НИР в области радиофизики	Уметь при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений. ПК-2.3: Владеть навыками самостоятельной постановки, критического переосмысления и решения новых задач в области радиофизики.		
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	2
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	0
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32
- КСР	1
самостоятельная работа	39
Промежуточная аттестация	0
	Зачёт

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	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 (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
1. Введение. Кристаллическая структура твердого тела	7	0	4	4	3

2. Колебания и волны в кристаллической решетке. Электроны в периодическом потенциале	7	0	4	4	3
3. Статистика носителей заряда, Квазиклассическое описание движения носителей заряда	7	0	4	4	3
4. Неравновесные явления в полупроводниках. Процессы переноса в неоднородных полупроводниках.	8	0	4	4	4
5. Теория р-п перехода, устройства на базе диода	8	0	4	4	4
6. Биполярный транзистор. Работа биполярных транзисторов в схемах	8	0	4	4	4
7. Явления на резкой границе раздела материалов	8	0	4	4	4
8. Полевой транзистор с р-п переходом и барьером Шоттки, полевой транзистор металл-диэлектрик-полупроводник, полевой транзистор металл-окисел-полупроводник	10	0	2	2	8
9. Оптоэлектронные приборы.	8		2	2	6
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	72	0	32	33	39

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение. Кристаллическая структура твердого тела
2. Колебания и волны в кристаллической решетке. Электроны в периодическом потенциале
3. Статистика носителей заряда, Квазиклассическое описание движения носителей заряда
4. Неравновесные явления в полупроводниках. Процессы переноса в неоднородных полупроводниках.
5. Теория р-п перехода, устройства на базе диода
6. Биполярный транзистор. Работа биполярных транзисторов в схемах
7. Явления на резкой границе раздела материалов
8. Полевой транзистор с р-п переходом и барьером Шоттки, полевой транзистор металл-диэлектрик-полупроводник, полевой транзистор металл-окисел-полупроводник
9. Оптоэлектронные приборы.

Практические занятия /лабораторные работы организуются, в том числе, в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 4 ч.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

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. p-n переход в состоянии 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.

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.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-1:

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.

5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-2:

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 состояние равновесия и под внешним напряжением. Вольт-амперные характеристики перехода.

10. Контакт металл-полупроводник. Гетеропереход.

11. Принципы работы биполярного и гетробиполярного транзисторов.

12. Биполярный и гетробиполярный 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.

Критерии оценивания (оценочное средство - Собеседование)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо» ИЛИ Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельным и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторым и недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка	Уровень подготовки
--------	--------------------

зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-1

1. Вывести дисперсионную характеристику для акустических фононов в полупроводниковых кристаллах. Качественно объяснить причины возникновения оптических фононов в сложных кристаллических решетках.
2. Вывести соотношение Эйнштейна, 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 n^+ - p -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 $n=1900 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; $p=425 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-2

1. Удельное сопротивление собственного германия при 27°C равно 0,47 Ом·м. Вычислить концентрацию электронов и дырок.
2. 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 $\hbar\omega_0 = 60 \text{ мэВ}$.
3. 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 $p=1900 \text{ см}^2/\text{Вс}$, $n=3500 \text{ см}^2/\text{Вс}$. 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 .
4. Рассчитать контактную разность потенциалов в Ge-p-n переходе. Удельное сопротивление p и n областей $=2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. 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?
5. 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.
6. 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 $2,0\cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»

Оценка	Критерии оценивания
не зачтено	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо» ИЛИ Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

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

Основная литература:

1. Шалимова Клавдия Васильевна. Физика полупроводников : учебник. - Изд. 4-е, стер. - СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2010. - 400 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0922-8 : 703.56., 39 экз.
2. Киттель Чарлз. Элементарная физика твердого тела / пер. с англ. А. А. Гусева. - М. : Наука, 1965. - 366 с. : ил. - 1.30., 37 экз.

Дополнительная литература:

1. Киреев Петр Семенович. Физика полупроводников : [учеб. пособие для втузов]. - Изд. 2-е, доп. - М. : Высшая школа, 1975. - 584 с. - 1.37., 22 экз.
2. Ансельм Андрей Иванович. Введение в теорию полупроводников = Introduction to the Semi-conducting Theory : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по физ. и техн. направлениям и специальностям. - Изд. 3-е, стер. - СПб. : Лань, 2008. - 624 с. : ил. - (Классическая учебная литература по физике / ред. совет: Ж. И. Алферов (пред.) [и др.]) (Учебники для вузов. Специальная литература) (Лучшие классические учебники). - ISBN 978-5-8114-0762-0 : 419.50., 25 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

-

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 03.03.03 - Радиоп физика.

Автор(ы): Волкова Екатерина Валерьевна, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Кудрин Александр Владимирович, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18 декабря 2023 г., протокол № 09/23.