

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Физический факультет

---

Кафедра физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники

УТВЕРЖДЕНО

решением ученого совета ННГУ  
протокол № 6 от «31» мая 2023 г.

**Рабочая программа дисциплины  
Практикум по физике полупроводников**

---

Уровень высшего образования  
бакалавриат

Направление подготовки: 11.03.04 - Электроника и нанoeлектроника  
Направленность (профиль): твердотельная электроника и нанoeлектроника

Форма обучения: очная

Нижегород, 2023

## 1. Место и цели дисциплины (модуля) в структуре ООП

Дисциплина «Практикум по физике полупроводников» относится к дисциплинам обязательной части образовательной программы по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника». Для усвоения данного курса необходимы знания по таким модулям и дисциплинам в рамках образовательной программы бакалавра как модуль «Математика», курс «Квантовая механика» модуля «Теоретическая физика» и курс «Физика конденсированного состояния».

Освоение данной дисциплины обязательно и предполагается в 6-м семестре, поскольку оно необходимо как предшествующее для дисциплин профессионального цикла «Физика низкоразмерных систем», «Материалы и методы нанотехнологии», «Физические основы электроники», «Наноэлектроника», «Схемотехника», «Основы проектирования электронной компонентной базы», «Основы технологии электронной компонентной базы», а также дисциплин по выбору «Квантовая и оптическая электроника», «СВЧ-электроника», «Экспериментальные методы исследования», «Ионно-лучевые методы формирования микро- и наноструктур» и др.

«Практикум по физике полупроводников» - естественнонаучная дисциплина, представляющая собой раздел физики твердого тела, в котором углубленно изучаются свойства полупроводников, определяющие их ведущую роль в современной электронике, а также важные для понимания физических процессов при проведении фундаментальных исследований полупроводниковых низкоразмерных систем.

**Цель изучения дисциплины** - сформировать фундамент знаний и навыков, необходимых для осознанного и целенаправленного использования свойств полупроводников при разработке и создании полупроводниковых приборов и элементов наноэлектроники.

**Задачами курса** являются: изучение взаимосвязи состава и структуры полупроводников и их физических свойств; обучение методам расчета и измерений параметров и характеристик полупроводников; создание основы для последующего изучения вопросов физики полупроводниковых приборов, включая элементы и приборы наноэлектроники, физики низкоразмерных систем, твердотельной электроники и технологии микро- и наноэлектроники.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции	Результаты обучения по дисциплине	
ОПК 1. Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной	ОПК-1.1. Знает фундаментальные законы природы и основные физические и математические законы ОПК-1.2. Умеет при-	<b>Знать:</b> – основы зонной теории твердых тел; – классификацию и особенности реальной зонной структуры элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений, параметры их зонной структуры, определяющие возможность и эффективность использо-	<i>Контрольные вопросы и задания лабораторного практикума, план-отчет лабораторного практику-</i>

<p>деятельности</p>	<p>менять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера</p> <p>ОПК-1.3. Владеет навыками использования знаний физики и математики при решении практических задач</p>	<p>вания для конкретных практических приложений;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– типы и роль примесей в полупроводниках, методы описания мелких и глубоких примесных состояний, методы расчета положения уровня Ферми в полупроводнике, особенности температурной зависимости концентрации носителей заряда, основные эффекты, проявляющиеся при высоком уровне легирования, природу и свойства поверхностных состояний;</li> <li>– статистику равновесных и неравновесных электронов и дырок в полупроводниках.</li> <li>– теорию явлений переноса заряда.</li> <li>– оптические, электрические, гальваномагнитные, термоэлектрические свойства полупроводников.</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– объяснять сущность физических явлений и процессов в полупроводниках и простейших полупроводниковых структурах;</li> <li>– производить анализ и делать количественные оценки параметров физических процессов;</li> <li>– экспериментально определять основные параметры полупроводника – ширину запрещенной зоны, концентрацию, подвижность, время жизни, коэффициент диффузии носителей заряда;</li> <li>– изучать оригинальные научные работы и обзоры в области физики полупроводников.</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <p>навыками применения полученных знаний для решения конкретных задач, возникающих как в научно-исследовательской работе, так и в производственно-технологическом процессе.</p>	<p>ма</p>
---------------------	---	---	-----------

<p>ОПК ОС-6. Способность применять фундаментальные знания о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учитывать современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности</p>	<p>ОПК ОС-6.1. Знает фундаментальные основы нанотехнологий, физические свойства систем с пониженной размерностью</p> <p>ОПК ОС-6.2. Знает современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности</p> <p>ОПК ОС-6.3. Умеет применять знания об основах нанотехнологий и физических свойствах систем с пониженной размерностью в своей профессиональной деятельности</p>	<p><b>Знать:</b> фундаментальные основы нанотехнологии, физические свойства систем с пониженной размерностью на основе полупроводников; современные тенденции развития нанотехнологий создания полупроводниковых квантоворазмерных наногетероструктур в своей профессиональной деятельности.</p> <p><b>Уметь</b> применять знания физики полупроводников в своей профессиональной деятельности.</p>	<p><i>Контрольные вопросы и задания лабораторного практикума, план-отчет лабораторного практикума</i></p>
---	---	---	---

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1. Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	2 ЗЕТ
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа): - занятия лабораторного типа - контроль самостоятельной работы (отчеты по лабораторным работам)	64 1
самостоятельная работа	7 (работа в семестре)
Промежуточная аттестация	6 семестр – зачет

Объем дисциплины составляет 2 зачетных единиц, всего 72 часа, из которых 65 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (64 часа лабораторные работы, 1 час мероприятия промежуточной аттестации), 7 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

#### 3.2. Содержание дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе	
		Контактная работа, часов	Самостоятельная

		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	работа обучающегося, часов
1. Статистика равновесных электронов и дырок	13			12	12	1
2. Статистика неравновесных электронов и дырок	13			12	12	1
3. Оптические свойства полупроводников	13			12	12	1
4. Явления переноса заряда в полупроводниках	13			12	12	1
5. Р-п-переход в полупроводниках	19			16	16	3
<b>Промежуточная аттестация по дисциплине:</b> зачет – 1 час						

### Содержание разделов дисциплины

1. Введение. Цель и задачи курса. Основная и дополнительная литература. Общая характеристика проводников электричества. Фундаментальные свойства и природа электропроводности металлов, полупроводников и ионных проводников электричества. Классическая теория электронной проводимости. Модель Друде. Понятия дрейфа, времени релаксации и подвижности носителей тока. Закон Ома. Механизмы образования носителей тока. Электронная и дырочная проводимость. Примесная проводимость. Качественная интерпретация свойств с точки зрения зонной теории. Краткая характеристика важнейших классов полупроводников ( $A^4$ ,  $A^3B^5$ ,  $A^2B^6$ , органические, аморфные полупроводники).

2. Основы зонной теории твердого тела. Уравнение Шредингера для кристалла и основные приближения теории твёрдого тела (ТТ). Адиабатическое приближение и валентная аппроксимация. Одноэлектронное приближение. Качественное сравнение энергетических спектров свободного электрона, электрона в атоме и в кристалле. Энергетический спектр ТТ на примере кремния. Волновая функция Электрона в кристалле.

Теорема Блоха и её следствия. Дисперсионное соотношение и его свойства. Зоны Бриллюэна.

Приближение эффективной массы. Электроны и дырки. Модель Кронига-Пенни. Структура энергетических зон полупроводников. Стандартная зонная структура и типичные отклонения от нее (непрямозонность, многодолинность, вырождение зон, несферичность изоэнергетических поверхностей). Зона Бриллюэна алмазоподобных полупроводников и особенности зонной структуры некоторых из них (Si, Ge,  $Si_xGe_{1-x}$ , GaAs, GaP,  $GaAs_{1-x}P_x$ , InSb). Период решётки, ширина запрещённой зоны основных полупроводников и инжиниринг прямозонных твёрдых растворов на их основе. Водородоподобная модель примесных центров и

энергетических уровней в кристалле. Локализованные состояния на поверхности кристалла. Уровни Тамма.

3. Статистика равновесных электронов и дырок. Общая характеристика равновесного состояния. Принцип детального равновесия. Модель полупроводника. Функция плотности состояний и функция распределения электронов и дырок. Масса плотности состояний. Уровень Ферми. Распределение электронов и дырок по энергии. Зависимость концентрации электронов и дырок от уровня Ферми. Невырожденные полупроводники. Условие электрической нейтральности. Температурная зависимость концентрации носителей и уровня Ферми (собственный полупроводник, некомпенсированный и компенсированный примесный полупроводник). Температурная зависимость ширины запрещенной зоны. Условие равновесия электронов и дырок. Понятие основных и неосновных носителей тока. Сильно легированные полупроводники. Уменьшение энергии ионизации при сильном легировании. Прыжковая примесная проводимость. Вырождение электронного газа. Свойства вырожденного и невырожденного газа.

4. Статистика неравновесных электронов и дырок. Неравновесное состояние. Принцип детального равновесия. Генерация, термализация и рекомбинация неравновесных носителей. Стационарные концентрации неравновесных носителей. Квазиуровни Ферми. Время жизни. Уравнение непрерывности. Механизмы рекомбинации. Зависимость времени жизни от уровня легирования и температуры для основных механизмов рекомбинации. Межзонная излучательная рекомбинация. Межзонная безизлучательная рекомбинация. Рекомбинация через ловушки (Теория Шокли - Рида - Холла). Случай нескольких типов ловушек. Центры прилипания и их влияние на кинетику неравновесных процессов.

5. Оптические свойства полупроводников. Оптические параметры и связь между ними. Коэффициент поглощения. Дифференциальный и интегральный закон поглощения. Механизмы поглощения света. Собственное поглощение. Прямые и непрямые оптические переходы. Спектральная зависимость коэффициента поглощения и зонная структура полупроводников. Эффект Франца-Келдыша. Эффект Бурштейна-Мосса. Экситоны и экситонное поглощение. Примесное поглощение. Поглощение излучения свободными носителями.

6. Люминесценция и стимулированное излучение. Виды люминесценции. Фотолюминесценция (ФЛ). Межзонная, экситонная, примесная и внутрицентровая ФЛ. Общие закономерности кинетики и температурной зависимости ФЛ. Люминофоры и их применение.

Стимулированное излучение. Принцип действия твердотельных лазеров, их основные характеристики и технические применения. Инверсная населенность уровней и усиление излучения. 3-х и 4-х уровневые системы. Резонатор Фабри-Перо. Спектр излучения лазера. Угловая расходимость пучка. Мощность излучения. Рубиновый лазер. Лазер с модулированной добротностью. Лазерные материалы. Применение твердотельных лазеров. Полупроводниковые лазеры.

7. Явления переноса заряда в полупроводниках. Общая теория явлений переноса заряда. Выражение для плотности тока. Кинетическое уравнение Больцмана и его решение для полупроводника, находящегося в электрическом, магнитном и температурном поле. Кинетические коэффициенты. Интеграл столкновений. Механизмы рассеяния носителей в ТТ. Тепловое или решеточное рассеяние. Рассеяние на акустических и оптических колебаниях (фо-

нонах) решетки. Пьезоэлектрическое рассеяние. Примесное рассеяние на нейтральной и ионизированной примеси. Время релаксации импульса и его зависимость от скорости для основных механизмов рассеяния. Электропроводность полупроводников. Вычисление кинетического коэффициента, определяющего электропроводность. Дрейфовая подвижность носителей тока и ее зависимость от уровня легирования и температуры. Температурная зависимость электропроводности полупроводников.

8. Р-п-переход в полупроводниках. Энергетическая диаграмма, распределение потенциала и механизм выпрямления в тонком р-п-переходе. Вольтамперная характеристика и емкость перехода. Особенности механизма выпрямления в толстом (р-і-п) и вырожденном переходе. Явление фотоэдс на р-п-переходе. Приборы с р-п-переходом (основные характеристики и параметры, области применения). Диоды и силовые вентили. СВЧ-диоды. Туннельные диоды. Приборы с вольтамперной характеристикой S-типа. Биполярные транзисторы. Фотодиоды и солнечные фотопреобразователи. Светодиоды и инжекционные лазеры.

#### **4. Образовательные технологии**

Основные виды образовательных технологий: лабораторный практикум, самостоятельная работа и промежуточная аттестация в форме зачета.

#### **5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

*Виды самостоятельной работы.* Самостоятельная работа включает теоретическую подготовку, связанную с допуском и написанием отчётов по лабораторным работам. Самостоятельная работа может проводиться как в домашних условиях, так и в читальном зале библиотеки, в компьютерных классах, в учебных кабинетах (лабораториях) с доступом к лабораторному оборудованию, приборам, базам данных, к Интернет-ресурсам. Текущий контроль успеваемости сводится к контрольным опросам по спискам вопросов, приведённым в описаниях лабораторных работ, а также путём проверки протоколов измерений и отчётов по заданиям выполненных работ.

*Перечень лабораторных работ:*

1. Эффект Холла в полупроводниках (Ge, Si, GaAs).
2. Определение параметров полупроводника из температурной зависимости удельного сопротивления и эффекта Холла.
3. Исследование собственного оптического поглощения в полупроводниках (Si, GaAs).
4. Исследование спектральной зависимости фоточувствительности полупроводниковых фотоприемников (Si-фотодиод, CdS-фоторезистор).
5. Исследование вольтамперных и вольтфарадных характеристик р-п-перехода.

*Вопросы и задания лабораторного практикума:*

## Лабораторная работа «Эффект Холла в полупроводниках (Ge, Si, GaAs)»

Вопросы:

1. Что означают термины слабое магнитное поле, сильное магнитное поле.
2. Общая характеристика гальваномагнитных явлений. Механизм возникновения эффекта Холла. Эффект Холла в полупроводнике с одним сортом носителей. Как определить знак основных носителей из измерений эффекта Холла?
3. Какими физическими величинами определяется ЭДС Холла? Объясните зависимость ЭДС Холла от величины индукции магнитного поля.
4. Каким образом механизмы рассеяния влияют на величину постоянной Холла? В каком случае холловская и дрейфовая подвижности равны?
5. Эффект Холла в полупроводнике с двумя сортами носителей. Выведите формулу для постоянной Холла в случае биполярной проводимости.
6. Нарисуйте и объясните зависимость постоянной Холла от температуры. При каких условиях наблюдается разрыв на зависимости  $\lg R_H(T)$ ?
7. Какую информацию о полупроводнике можно получить из совместных измерений электропроводности и эффекта Холла? Какую информацию можно получить при исследовании эффекта Холла в классически сильных магнитных полях?
8. Методика измерений эффекта Холла на образце прямоугольной формы. ЭДС побочных эффектов, их учет при измерении холловского напряжения.
9. Методика измерений эффекта Холла на плоском образце произвольной формы (метод Ван-дер-Пау).

Задания:

1. Измерить сопротивление и ЭДС Холла на образце произвольной формы методом Ван-дер-Пау при нескольких значениях тока.
2. Проверить пропорциональность ЭДС Холла току через образец. Построить график.
3. Рассчитать параметры  $\rho$ ,  $R_H$ ,  $\mu$ , и  $n$  при нескольких значениях тока  $I$ . Сделать вывод о типе носителей заряда.
4. Сделать вывод о характере магнитного поля (сильное или слабое).

## Лабораторная работа «Определение параметров полупроводника из температурной зависимости удельного сопротивления и эффекта Холла»

Вопросы:

1. Классификация веществ по удельной электрической проводимости. Зависимость электропроводности от температуры. Полупроводники. Зонная структура полупроводника. Понятие эффективной массы.
2. Понятие равновесных и неравновесных носителей. Понятие дырки. Понятие генерации и рекомбинации.
3. Элементарная теория электропроводности полупроводника. Понятие о подвижности носителей. Механизм собственной и примесной электропроводности.

4. Понятие энергии и уровня Ферми в полупроводниках. Зависимость положения уровня Ферми и концентрации носителей от температуры в собственном и примесном полупроводнике.
5. Какую информацию о полупроводнике можно получить из совместных температурных измерений электропроводности и эффекта Холла?
6. Механизмы рассеяния. Зависимость подвижности и электропроводности от температуры.

#### Задания:

1. Измерить удельное сопротивление и ЭДС Холла в предложенных образцах при комнатной температуре и их температурные зависимости в диапазоне 100–500 К.
2. Определить тип примесной проводимости исследуемого кристалла. Сравнить полученные значения подвижности с табличными значениями для данного типа проводимости, температуры и уровня легирования полупроводника.
3. Построить зависимости  $\lg R_H$ ,  $\lg n(p)$ ,  $\lg \sigma$  от  $10^3/T$ . На всех кривых отметить участки примесной и собственной проводимости. Проанализировать и объяснить поведение  $R_H$  в области перехода к собственной проводимости, сделав из этого вывод о типе примеси в образце. Обратит внимание на различие зависимостей  $\lg n(p)$  и  $\lg \sigma$  от  $10^3/T$  в области явно выраженной примесной проводимости и объяснить его.
4. Построить зависимость  $\lg(n \cdot T^{-3/2})$  от  $10^3/T$ . По участку собственной проводимости определить ширину запрещенной зоны. Полученные результаты сравнить с табличными значениями.
5. По плато на зависимости  $\lg n(p)$  от  $10^3/T$  в области примесной проводимости оценить концентрацию примеси.

#### Лабораторная работа «Исследование собственного оптического поглощения в полупроводниках (Si, GaAs)»

#### Вопросы:

1. В чем состоит закон Бугера-Ламберта?
2. Каков физический смысл коэффициента поглощения?
3. Виды оптического поглощения в полупроводниках.
4. Понятие о прямозонных и непрямозонных полупроводниках.
5. Прямые переходы. Диаграмма взаимодействия и законы сохранения для прямых переходов.
6. Непрямые переходы. Диаграмма взаимодействия и законы сохранения для непрямых переходов.
7. Какое состояние называется виртуальным? Какое состояние может выступать в качестве виртуального и чем определяется время пребывания в нем?

8. Форма края собственного поглощения при прямых переходах.
9. Что такое экситон?
10. Что собой представляет спектр экситонов?
11. Как влияют экситоны на спектр поглощения полупроводника при прямых переходах?
12. Форма края собственного поглощения при непрямых переходах.
13. Как влияют экситоны на спектр поглощения полупроводника при непрямых переходах?
14. Могут ли наблюдаться непрямые переходы в прямозонном полупроводнике?
15. Укажите область энергий фотонов, в которой обнаруживаются непрямые переходы в непрямозонном полупроводнике.
16. Какую информацию можно получить из исследований спектров собственного поглощения?
17. Как определить тип оптических переходов в полупроводнике?
18. Что такое оптическая плотность  $D$ ?
19. Если  $D=I$ , чему равен коэффициент пропускания образца?
20. Как из измерений пропускания рассчитать коэффициент поглощения?

Задания:

1. Измерить спектральную зависимость оптического пропускания предложенных образцов (Si, GaAs).
2. По формуле  $\alpha = \frac{1}{d} \cdot \ln \frac{(1-R)^2}{T}$ , используя полученные данные, рассчитать коэффициент поглощения  $\alpha$ , считая, что коэффициент отражения постоянен и равен 0.3 для обоих материалов.
3. Построить зависимости  $\alpha^2(\hbar\nu)$  и  $\alpha^{1/2}(\hbar\nu)$  для всех образцов. Определить тип оптических переходов и ширину запрещенной зоны.
4. Сравнить полученные значения с табличными значениями и дать интерпретацию полученных результатов.

### **Лабораторная работа «Исследование спектральной зависимости фоточувствительности полупроводниковых фотоприемников (Si-фотодиод, CdS-фоторезистор)»**

Вопросы:

1. Что такое фотопроводимость и от каких параметров она зависит? Что такое примесная и собственная фотопроводимость?
2. В результате каких видов поглощения может возникнуть фотопроводимость? Нарисуйте схемы соответствующих оптических переходов.
3. Что такое монополярная фотопроводимость? При каких условиях собственная фотопроводимость может быть монополярной?
4. Почему считают, что подвижность неравновесных носителей такая же, как и у равновесных?

5. Как фотопроводимость зависит от интенсивности освещения?
6. Что такое фоточувствительность и зачем вводится это понятие?
7. Как выглядит спектральная зависимость фотопроводимости? Чем объясняется длинноволновый и коротковолновый спад фотопроводимости?
8. Какие энергетические параметры полупроводника можно определить из спектральной зависимости фотопроводимости?
9. В чем состоит критерий Мосса и чем обусловлена необходимость его введения?
10. Каков механизм образования фотоэда и тока короткого замыкания при освещении р-п-перехода?
11. Как зависят от интенсивности освещения фотоэдс и ток короткого замыкания?
12. Какую величину нужно измерить, чтобы получить спектральную чувствительность фотодиода и почему?
13. Может ли наблюдаться фотоэдс в примесной области поглощения?
14. Схема измерения фотопроводимости.
15. Какой элемент схемы делает измеряемый сигнал переменным, и с какой целью это делается?
16. Режим постоянного тока, постоянного поля и постоянной чувствительности. Какой из этих режимов и почему используется в данной работе?
17. В каком режиме производится исследование чувствительности фотодиода и как его реализовать?

Задания:

1. Ознакомиться с устройством монохроматора УМ-2.
2. Включить осветитель 1 и сфокусировать пучок света на входную щель монохроматора.
3. Установить барабан монохроматора так, чтобы на выходе у него был красный свет, и сфокусировать пучок света на фотоприемник.
4. Присоединить фотоприемник к измерительной схеме.
5. Включить измерительную схему. Проверить наличие сигнала.
6. Установить нагрузочное сопротивление  $R_H$ , чтобы выполнялся режим постоянного поля.
7. Установить минимальную ширину щелей монохроматора, при которой сигнал имеет достаточную величину.
8. Измерить зависимость величины сигнала от длины волны. Отсчет производить через 30-40 делений монохроматора.
9. Установить длину волны, при которой наблюдается максимальный сигнал для данного фотоприемника и снять зависимость величины сигнала от освещенности, пользуясь для этого калиброванными сетками.
10. Сменить фотоприемник и произвести операции, указанные в п.п. 3-9.
11. Построить зависимость величины сигнала от освещенности для всех использованных фотоприемников в двойном логарифмическом масштабе и определить показатель  $\alpha$ .

12. Рассчитать  $S(\lambda)$  или  $S^*(\lambda)$  для всех фотоприемников и построить графики. При расчетах пользоваться градуировочными таблицами.
13. Определить длинноволновые границы fotocувствительности и интерпретировать их.

### Лабораторная работа «Исследование вольтамперных и вольтфарадных характеристик р-п-перехода»

Вопросы:

1. Что такое р-п-переход?
2. Чем определяется контактная разность потенциалов в р-п-переходе?
3. Как распределяется потенциал в р-п-переходе?
4. Чем определяется толщина слоя объемного заряда в переходе?
5. Почему сопротивление перехода больше сопротивления объемных областей?
6. Что такое барьерная емкость и как она зависит от напряжения смещения? Нарисовать зависимость  $C(V)$  в координатах  $C - V$  и  $1/C^2 - V$ .
7. Какую информацию можно извлечь из зависимости  $C(V)$  и как это сделать?
8. Объяснить, почему р-п-переход выпрямляет.
9. Какой вид имеет ВАХ обычного р-п-перехода и каким выражением она описывается? Условия применимости этого выражения.
10. Почему р-п-переход перестает работать при высоких температурах?
11. Нарисовать энергетические диаграммы р-п-перехода в равновесном состоянии, при положительном смещении и отрицательном смещении.
12. Какой вид имеет ВАХ туннельного диода? Нарисовать и пояснить ее вид с помощью энергетических диаграмм.
13. Чем определяется на характеристике положение пика и минимума?
14. Какой вид будет иметь ВАХ диода, в котором использованы материалы, у которых уровни Ферми совпадают с краями зон?
15. Возможны ли туннельные токи в выпрямительных диодах? Если возможны, то при каких условиях?
16. Поясните схему измерения ВАХ. Почему при измерении прямой и обратной ветвей вольтметр и амперметр нужно включать по-разному?
17. Ознакомится с принципом действия прибора для измерения вольт-фарадных характеристик.

Задания:

1. Измерить ВАХ р-п-переходов в невырожденном полупроводнике. В качестве объекта исследования взять один германиевый и один кремниевый плоскостные диоды.
2. Построить ВАХ переходов в обычных координатах и сравнить их. Построить прямые ветви в полулогарифмических координатах, определить их наклон и сравнить с теоре-

тическим значением. Определить из графиков ток насыщения и сравнить его с измеренным при обратном смещении.

3. Измерить ВАХ р-п-перехода в вырожденном полупроводнике. В качестве объекта исследования взять туннельный диод.
4. Построить ВАХ туннельного диода. Сравнить ее с ВАХ выпрямительного диода.
5. Измерить ВФХ кремниевого и германиевого диодов.
6. Построить характеристики в координатах  $I/C^2 = f(V)$  и  $I/C^3 = f(V)$  и по спрямлению одной из них сделать заключение о характере перехода (резкий или плавный). Определить величину  $\varphi_k$ .

## 6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы в формировании которых учувствует дисциплина с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	Неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	Не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полностью знания 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, без ошибок.	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.	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественным недочетами, выполнены все задания в полном	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов

				недочетами.		объеме.	
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. 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 некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки  при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки  при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстрированы навыки  при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

## 6.2. Описание шкал оценивания

### Оценка «зачтено» (или «зачет»):

- предполагает удовлетворительный уровень знаний, умений и владений (навыков), изложенных в программе курса;
- выставляется автоматически при 100% посещаемости, сдаче допусков, своевременном написании и сдаче отчетов по лабораторным работам;
- может быть также получена в назначенный по расписанию экзаменационной (зачётной) сессии день, при условии полной ликвидации задолженностей по посещаемости, предоставлении и сдаче полного комплекта отчетов.

### Оценка «не зачтено» (или «незачет»):

- предполагает неудовлетворительный уровень знаний, умений и владений (навыков), изложенных в программе курса;
- выставляется в «зачётный» день в случае непредставления полного комплекта отчетов;
- пропуски более двух лабораторных работ по уважительной либо без уважительной причины дают основание для тщательной проверки знаний «пропущенного» материала и существенно повышают шанс выставления отрицательной оценки. При этом выявленная неготовность к сдаче лабораторного допуска также рассматривается как «прогул».

## 6.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя контрольные вопросы, содержащиеся в учебно-методических пособиях по лабораторным работам. Эти вопросы используются при допуске к выполнению экспериментальной части работ. По итогам проверки отчётов о выполнении работ заполняется контрольный лист, в котором преподаватели, проводившие лабораторные занятия выставляют отметку о выполнении. Лабораторный практикум по курсу считается пройденным если в контрольном листе набрано 5 отметок о выполнении лабораторных работ.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

**а) основная литература:**

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников.-М.: Энергия, 1976.-416 с.  
<https://e.lanbook.com/book/167840>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Shalimova.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Shalimova.pdf)
2. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твёрдого тела: Учеб.- 3-е изд., стер.- М: Высш. шк.- 2000.- 494 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=44686&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Pavlov-Khokhlov.djvu](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Pavlov-Khokhlov.djvu)  
[http://www.studmed.ru/pavlov-pv-hohlov-af-fizika-tverdogo-tela\\_0c8e3f3519f.html#](http://www.studmed.ru/pavlov-pv-hohlov-af-fizika-tverdogo-tela_0c8e3f3519f.html#)
3. Киреев П.С. Физика полупроводников.-М.: Высш. шк., 1975.-584 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=397920&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Kireev.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Kireev.pdf)  
[http://www.studmed.ru/kireev-ps-fizika-poluprovodnikov\\_24cecbadf3e.html](http://www.studmed.ru/kireev-ps-fizika-poluprovodnikov_24cecbadf3e.html)
4. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников.-М.: Наука, 1990.- 688 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=445646&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=BonchBuevich-Poluprovodniki.djvu](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=BonchBuevich-Poluprovodniki.djvu)
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов.-М.: Мир, 1984.-Т. 1.-456 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=324623&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Zse 2.djvu](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Zse 2.djvu)
6. Физика твёрдого тела: Лабораторный практикум. Учебное пособие. В 2 т. /Под ред. проф. А.Ф. Хохлова. Том 2. Физические свойства твёрдых тел. -М: Высш. шк., 2001.- 484 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=42525&idb=0>

**б) дополнительная литература:**

1. Зеегер К. Физика полупроводников.-М.: Мир, 1977.- 616 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=85771&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Zeeger-Poluprovodniki.djvu](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Zeeger-Poluprovodniki.djvu)
2. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников.-М.: Высш. шк., 1984.-352 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=397943&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Fistul.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Fistul.pdf)
3. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела.-М.: Наука, 1978.-792 с.  
[http://www.studmed.ru/kittel-ch-vvedenie-v-fiziku-tverdogo-tela-v-2-h-tomah\\_9d52ded9eac.html](http://www.studmed.ru/kittel-ch-vvedenie-v-fiziku-tverdogo-tela-v-2-h-tomah_9d52ded9eac.html)  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Kittel-VvedVFizikuTvTela.djvu](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Kittel-VvedVFizikuTvTela.djvu)
4. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М. Радио и связь.1990.- 264 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=454236&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Wikulin-Stafeev.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Wikulin-Stafeev.pdf)
5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М. ФМЛ. 1978.-616 с.  
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=397901&idb=0>  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Anselm-Poluprovodniki.djvu](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Anselm-Poluprovodniki.djvu)  
[https://e.lanbook.com/reader/book/71742/#book\\_name](https://e.lanbook.com/reader/book/71742/#book_name)
6. Ю П., Кардона М. Основы физики полупроводников /Пер. с англ. И.И. Решиной. Под ред. Б.П. Захарчени.- 3-е изд.- М.: Физматлит, 2002.- 560 с.  
[http://spen.phys.unn.ru/library\\_dl.asp?fn=Yu-Cardona.pdf](http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Yu-Cardona.pdf)

## в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

<http://www.lib.unn.ru/> - Фундаментальная библиотека ННГУ

<https://e.lanbook.com/> - Электронно-библиотечная система изд. «Лань»

<http://spen.phys.unn.ru/library.asp> - Электронная библиотека ФзФ ННГУ

<http://www.studmed.ru> - Учебно-методическая литература для студентов

<http://www.ph4s.ru> - Образовательный проект А.Н. Варгина

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

При выполнении лабораторных работ используется **лаборатория физики полупроводников** кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники (ФПЭН) оснащенная источниками питания, генераторами, вольтметрами, осциллографами, системой холловских измерений Nanometrics HL5500PC с криостатом и буферным усилителем, комплектом оптических монохроматоров и спектрофотометров.

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 установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 11.03.04 – «Электроника и наноэлектроника».

Автор проф. Д.А. Павлов

Рецензент:  
заведующий кафедрой  
теоретической физики, д.ф.-м.н.

В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой  
физики полупроводников, электроники и наноэлектроники,  
д.ф.-м.н., профессор

Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета ННГУ,  
протокол б/н от «20» мая 2023 г.

Председатель Учебно-методической комиссии  
физического факультета ННГУ

А.А. Перов