

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:  
Декан физического факультета  
С.Н. Филимонов

Рабочая программа дисциплины

**Физика полупроводников**

по направлению подготовки / специальности

**03.03.02 Физика**

Направленность (профиль) подготовки / специализация:  
**«Фундаментальная физика»**

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация  
**Бакалавр**

Год приема  
**2023**

СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ОП  
О.Н. Чайковская

Председатель УМК  
О.М. Сюсина

Томск – 2023

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-2 Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.

ПК-1 Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 2.2 Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования

ИПК 1.1 Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования

## **2. Задачи освоения дисциплины**

- Освоить аппарат курса физики полупроводников.
- Научиться применять понятийный аппарат курса физики полупроводников для решения практических задач профессиональной деятельности.

## **3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплина (модули)».

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор.

## **4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине**

Пятый семестр, зачет с оценкой

Шестой семестр, экзамен

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины (модуля)**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 7 з.е., 252 часов, из которых:

-лекции: 64 ч.

-лабораторные: 32 ч.

-практические занятия: 16 ч.

в том числе практическая подготовка: 16 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## **8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам**

Тема 1. Элементы зонной теории.

Зона Бриллюэна. Энергетические зоны. Изоэнергетические поверхности. Эффективная масса. Плотность квантовых состояний. Мелкие примесные уровни.

Тема 2. Статистика свободных носителей заряда.

Функция распределения Ферми-Дирака. Концентрация электронов и дырок. Уравнение электронейтральности. Заполнение электронами примесных центров. Зависимость положения уровня Ферми и концентрации носителей заряда от температуры в собственном и примесном полупроводниках. Полупроводник, содержащий донорную и акцепторную примесь.

### Тема 3. Кинетические явления.

Элементарная теория электропроводности. Кинетическое уравнение Больцмана для электронов в кристалле. Приближение времени релаксации. Неравновесная функция распределения в приближении параболического закона дисперсии. Плотность электрического тока и потока энергии. Тензоры кинетических коэффициентов. Электропроводность полупроводников; многодолинный полупроводник. Эффект Холла. Магнетосопротивление. Эффекты Эттингсгаузена и Нернста. Электронная теплопроводность. Термоэлектрические явления (Зеебека, Пельтье, Томсона). Термомагнитные эффекты. Флуктуационная неустойчивость и эффект Ганна.

### Тема 4. Теория рассеяния свободных носителей заряда.

Эффективное сечение рассеяния. Время релаксации для упругих соударений. Рассеяние электронов на ионах примеси. Рассеяние на акустических и полярных оптических фононах. Рассеяние на нейтральных атомах примеси, дислокациях и вакансиях.

### Тема 5. Процессы рекомбинации свободных носителей заряда.

Оже-рекомбинация. Поверхностная рекомбинация. Многофононная эмиссия. Рекомбинация через простые локальные центры: кинетические уравнения. Стационарный случай с малой концентрацией ловушек. Виды излучательных процессов. Соотношение Ван Русбрека-Шокли. Межзонная рекомбинация. Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от положения уровня Ферми, температуры и уровня возбуждения. Самопоглощение. Эффективность излучения. Экситонная рекомбинация. Примесное излучение. Донорно-акцепторные переходы. Спонтанное и вынужденное излучение.

### Тема 6. Процессы поглощения.

Оптические константы и взаимосвязь между ними. Экспериментальные методы определения оптических констант. Классический и квантовомеханический подходы в теории дисперсии оптических констант. Виды поглощения. Собственное поглощение. Прямые и непрямые оптические переходы; форма края основного поглощения в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Влияние внешних факторов на положение края основного оптического поглощения. Экситонное поглощение. Ионизация мелких примесных центров. Взаимодействие света с ионизированными примесными центрами. Неселективное поглощение свободными носителями заряда. Решеточное поглощение; однофононный резонанс.

### Тема 7. Фотоэлектрические явления.

Внутренний фотоэффект. Фотопроводимость. Релаксация фотопроводимости. Эффект Дембера. Внешний фотоэффект. Фотоэлектромагнитный эффект.

### Тема 8. Поверхностные электронные состояния.

Происхождение поверхностных состояний. Поверхностная электропроводность. Поверхностная рекомбинация.

Темы лабораторных работ:

1. Определение ширины запрещенной зоны.

2. Измерение удельного сопротивления четырехзондовым методом.
3. Эффект Холла.
4. Определение диффузионной длины.
5. Определение времени жизни.
6. Температурная зависимость коэффициента термоЭДС.
7. Изучение спектра оптического пропускания.
8. Металлографическое исследование полупроводников.

## 9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине осуществляется путем контроля посещаемости, выполнения практических заданий, выполнения лабораторных работ и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр. Оценочные материалы текущего контроля размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» – <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

## 10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

**Зачет с оценкой в первом семестре** проводится в письменной форме по билетам. Продолжительность зачета 1 час.

**Экзамен во втором семестре** проводится в письменной форме по билетам. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» – <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

## 11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» – <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=00000>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине (<https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>).

в) Методические указания по проведению лабораторных работ.

## 12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников : [учебное пособие для вузов по физическим и техническим направлениям и специальностям] / А.И. Ансельм. - Изд. 4-е, стер. - Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2021. - 624 с.

2. Шалимова К.В. Физика полупроводников: учебник / К. В. Шалимова. - Изд. 4-е, стер. - Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2021. – 384 с.

3. П. В. Павлов, А. Ф. Хохлов Физика твердого тела: учебное пособие /Павлов П. В., Хохлов А. Ф. Изд. 5-е, стер. - Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2021. – 493 с.

б) дополнительная литература:

1. Киреев П.С. Физика полупроводников. – М.: Высшая школа, 1975. – 584 с.

2. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1977. – 672 с.

3. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. – М.: Высшая школа, 1984. – 352 с.

4. Смит Р. Полупроводники. – М.: Мир, 1982. – 558 с.

5. Войцеховский А.В. Оптика полупроводников: учебное пособие / А.В. Войцеховский, А.С. Петров, Г.И. Потахова; под ред. А. С. Петрова; Том. гос. ун-т им. В.В.

Куйбышева. - Томск: Издательство Томского университета, 1987. - 221 с. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000087782>

6. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников / Ю.И. Уханов; Под ред. В.М. Тучкевича. - М. : Наука, 1977. - 366 с.

7. Ю П. Основы физики полупроводников / Питер Ю, Мануэль Кардона ; пер. с англ. И.И. Решиной ; под ред. Б.П. Захарчени. - 3-е изд. - Москва: Физматлит, 2002. - 560 с. URL: <http://sun.tsu.ru/limit/2016/000163251/000163251.pdf>

8. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках / Ж. Панков ; пер. с англ. под ред. Ж.И. Алферова, В.С. Вавилова. - Москва: Мир, 1973. - 456 с.

9. Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники: учебное пособие: [для студентов вузов / А.В. Войцеховский, И.И. Ижнин, В.П. Савчин, Н.М. Вакив; Томский гос. ун-т. - Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2013. - 559 с. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000464340>

в) ресурсы сети Интернет:

1. Меркулов И.А. Оптика полупроводников: курс лекций [Электрон. ресурс] / Образовательные программы ФТИ им. Иоффе. – Электрон. дан. – URL: [http://www.ioffe.ru/sol/pdf/Merkulov\\_lectures.pdf](http://www.ioffe.ru/sol/pdf/Merkulov_lectures.pdf), доступ свободный.

2. Физические основы полупроводниковой оптоэлектроники. (Ермаков О.Н., Пихтин А.Н. и др.) . – URL: [http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_491570](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_491570)

3. Гермогенов В.П., Вячистая Ю.В. Материалы, структуры и приборы полупроводниковой оптоэлектроники [Электрон. ресурс]: учебно-методический комплекс. – Электрон. дан. – Томск: ТГУ, 2012. – URL: <http://edu.tsu.ru/eor/resource/787/tpl/index.html> доступ свободный.

4. Новые полупроводниковые материалы: Характеристики и свойства [Электрон. ресурс] // Интернет-сайт ФТИ им А.Ф.Иоффе РАН, 1998-2001. – URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/rintroduction.html>, доступ свободный.

5. Технология микро- и нанозлектроники (Единое окно доступа к образовательным ресурсам). – URL: [http://window.edu.ru/catalog/resources?p\\_rubr=2.2.75.26.43](http://window.edu.ru/catalog/resources?p_rubr=2.2.75.26.43)

6. Физика и техника полупроводников (научный журнал РАН): электронная версия. – URL: <https://journals.ioffe.ru/journals/2>

7. Электронный каталог НБ ТГУ (<http://chamo.lib.tsu.ru>)

8. Поисковая система Google Scholar (<https://scholar.google.ru/>)

9. Портал образовательных ресурсов по нанотехнологиям <https://nanohub.org/>

### 13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

– Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);

– публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>

– ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>

– Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>

– ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>

– ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

в) профессиональные базы данных (*при наличии*):

– Университетская информационная система РОССИЯ – <https://uisrussia.msu.ru/>

– Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС) – <https://www.fedstat.ru/>

– Новые полупроводниковые материалы: Характеристики и свойства [Электрон. ресурс] // Интернет-сайт ФТИ им А.Ф.Иоффе РАН, 1998-2001. – URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/rintroduction.html>

#### **14. Материально-техническое обеспечение**

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

#### **15. Информация о разработчиках**

Новиков Вадим Александрович, кандидат физ.-мат. наук, кафедра физики полупроводников, физического факультета ТГУ, доцент.