

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

Физический факультет



С.Н. Филимонов

2021 г.

Рабочая программа дисциплины

Физика полупроводников

по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Профиль подготовки:
«Фундаментальная физика»

Форма обучения
Очная


Квалификация
Бакалавр

Год приема
2021

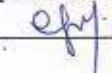
Код дисциплины в учебном плане: Б1.В.ДВ.01.06.03

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

 О.Н. Чайковская

Председатель УМК

 О.М. Сюсина

Томск – 2021

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

- ОПК-2 – способность проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;;
- ПК-1 – способность 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. Знает основы анализа и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования, необходимые для освоения и применения современных методов решений профессиональных задач;

ИПК-1.1. Владеет навыками сбора и анализа научно-технической информации 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 части, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор.

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

Семестр 5, зачет с оценкой.

Семестр 6, экзамен.

5. Входные требования для освоения дисциплины

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

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по дисциплинам модулей: «Общая физика», «Теоретическая физика», «Математическая физика».

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины (модуля)

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

- лекции: 64 ч.;
- практические занятия: 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). Терромагнитные 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 не прямые оптические переходы; форма края основного поглощения в прямозонных и непрямоzonных 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 проводится путем контроля посещаемости, выполнения практических заданий, выполнения лабораторных работ и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет с оценкой в пятом семестре проводится в письменной форме по билетам. К зачету допускаются студенты, успешно прошедшие все текущие аттестации. Билет содержит теоретический вопрос и задачу. Продолжительность зачета 1,5 часа.

Примерный перечень теоретических вопросов:

1. Что такое эффективная масса электрона?
2. Что такое плотность квантовых состояний?
3. Для каких частиц справедливо распределение Ферми-Дирака?
4. Какая величина определяется интегралом Ферми?
5. Что такое невырожденный полупроводник?
6. Как выглядит уравнение электронейтральности для модели полупроводника с двумя уровнями: донорным и акцепторным?
7. Что такое собственный полупроводник?
8. Чему равна концентрация свободных носителей в области истощения примесных центров?
9. Что такое кинетические явления?
11. Какое уравнение принято называть кинетическим уравнением Больцмана?
15. В чем сущность эффекта Холла?
16. Что такое магнитнорезистивный эффект?
17. Какие эффекты называются гальванотермомагнитными?
19. В чем сущность явления Зеебека?
20. Какие явления называются термомагнитными?
29. В чем смысл введения квазиуровней Ферми?

Примеры задач:

1. Задача 1.

Рассчитать эффективную плотность состояний в зоне проводимости и валентной зоне при использовании сферического (параболического) приближения, концентрацию свободных электронов и дырок для собственного (без примесного) полупроводника при температурах 300К и 400К. Определить на сколько увеличится концентрация свободных электронов. При расчете считать, что уровень Ферми располагается по середине запрещенной зоны.

Вариант 1. Кремний и GaAs

Вариант 2. Германий и GaN

Параметры полупроводников:

Si - $m_n = 0.98m_0$, $m_p = 0.49m_0$, $E_g = 1.12\text{eV}$

Ge - $m_n = 1.6m_0$, $m_p = 0.33m_0$, $E_g = 0.661\text{eV}$

GaAs - $m_n = 0.063 m_0$, $m_p = 0.082m_0$, $E_g = 1.42\text{eV}$

GaN - $m_n = 0.20 m_0$, $m_p = 0.8 m_0$, $E_g = 3.2\text{ eV}$

2. Задача 2.

Концентрация электронов в собственном полупроводнике равна $1,38 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$ при температуре 400°K . Ширина запрещенной зоны полупроводника изменяется по закону $E_g = 0.785 - 4 \cdot 10^{-4}T$ [эВ]. Найти значение произведения эффективных масс электрона и дырки.

3. Задача 3.

Вычислить удельное сопротивление собственного (без примесного) полупроводника (Si и Ge) при температуре 300°K , если известно, что подвижности электронов и дырок связаны соотношением $\mu_n = b\mu_p$, для расчета использовать следующие параметры:

Ge: $\mu_n = 3.8 \cdot 10^3\text{ см}^2/(\text{В с})$, $b = 2.1$

Si: $\mu_n = 1.45 \cdot 10^3\text{ см}^2/(\text{В с})$, $b = 2.9$

4. Задача 4.

Для собственного полупроводника (в соответствии с вариантом) определить величину изменения энергии Ферми (положения уровня Ферми в эВ) при изменении температуры кристалла с 200°K до 400°K .

Вариант 1. полупроводник - Si, $E_g = 1.170 - 4.73 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 / (T + 636)$ (eV), $m_n = 0.36m_0$, $m_p = 0.81m_0$

Вариант 2. полупроводник - Ge, $E_g = 0.742 - 4.8 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 / (T + 235)$ (eV), $m_n = 0.12m_0$, $m_p = 0.34m_0$

Вариант 3. полупроводник - GaAs, $E_g = 1.519 - 5.405 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 / (T + 204)$ (eV), $m_n = 0.036m_0$, $m_p = 0.53m_0$

5. Задача 5.

Определить температуру кристалла, при которой уровень Ферми пересекает примесный уровень в полупроводнике легированном донорной примесью с концентрацией 10^{17} см^{-3} . При расчете полагать, что электронный и дырочный газ не вырождены, факторы вырождения равны $g_1 = 2$, $g_0 = 1$. Тип полупроводника и энергия ионизации донорной примеси выбирается в соответствии с вашим вариантом.

Вариант 1. полупроводник - Si, $E_g = 1.17 - 4.73 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 / (T + 636)$ (eV), $m_n = 0.36m_0$, $m_p = 0.81m_0$, энергия ионизации мелкой донорной ($E_c - E_d$) примеси As равна 0.054 эВ.

Вариант 2. полупроводник - Si, $E_g = 1.17 - 4.73 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 / (T + 636)$ (eV), $m_n = 0.36m_0$, $m_p = 0.81m_0$, энергия ионизации мелкой донорной ($E_c - E_d$) примеси P равна 0.045 эВ.

Вариант 3. полупроводник - Si, $E_g = 1.17 - 4.73 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 / (T + 636)$ (eV), $m_n = 0.36m_0$, $m_p = 0.81m_0$, энергия ионизации мелкой донорной ($E_c - E_d$) примеси Sb равна 0.043 эВ.

Результаты зачета с оценкой определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». Оценка результатов экзамена формируется в соответствии с таблицей 10.1.

Таблица 10.1

Оценка	Результат, продемонстрированный студентом на экзамене
--------	---

Отлично	Студент, твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, способен самостоятельно принимать и обосновывать решения, оценивать их эффективность.
Хорошо	Студент твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает не критичные неточности в ответе
Удовлетворительно	Студент, показывает фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно точно формулирует базовые понятия.
Неудовлетворительно	Студенту не знает большей части основного содержания дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины.

Экзамен в шестом семестре проводится в письменной форме по билетам. Экзаменационный билет состоит из двух частей. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Первая часть содержит вопрос, проверяющий ИОПК-2.2. Ответ на вопрос первой части дается в развернутой форме.

Вторая часть содержит вопрос, проверяющий ИПК-1.1. Ответ на вопрос второй части дается в развернутой форме.

Примерный перечень теоретических вопросов для первой и второй части:

1. Что называется линейным коэффициентом поглощения? Что такое закон Бугера-Ламберта?
2. Сущность классического и квантовомеханического подходов в теории дисперсии оптических констант.
3. Механизмы поглощения в полупроводниках.
4. Собственное поглощение в прямозонном полупроводнике.
5. Собственное поглощение в не прямозонном полупроводнике.
6. Примесное поглощение в полупроводниках.
7. Неселективное поглощение свободными носителями заряда.
8. Решеточное поглощение.
9. Люминесценция.
10. Самопоглощение.
11. Спектр излучения при донорно-акцепторных переходах.
12. Оже-рекомбинация.
13. Рекомбинации через простые локальные центры.
14. Зависимость времени жизни от положения уровня Ферми для случая малой концентрации ловушек.
15. Зависимость времени жизни от температуры для случая малой концентрации ловушек.
16. Внутренний фотоэффект.
17. Релаксация фотопроводимости при малом уровне возбуждения.
18. Эффект Дембера.
19. Внешний фотоэффект.
20. Амбиполярная диффузия и амбиполярный дрейф.
21. Рассеяние свободных носителей заряда на ионизованных атомах примеси.
22. Рассеяние свободных носителей заряда на фононах.
23. Межзонная рекомбинация.
24. Спонтанное и вынужденное излучение.
25. Поверхностная электропроводность.
26. Поверхностная рекомбинация

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». Оценка результатов экзамена формируется в соответствии с таблицей 10.2.

Таблица 10.2

Оценка	Результат, продемонстрированный студентом на экзамене
Отлично	Студент, твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, способен самостоятельно принимать и обосновывать решения, оценивать их эффективность.
Хорошо	Студент твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает не критичные неточности в ответе
Удовлетворительно	Студент, показывает фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно точно формулирует базовые понятия.
Неудовлетворительно	Студенту не знает большей части основного содержания дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины.

11. Учебно-методическое обеспечение

- а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=22039>
- б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.
- 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, 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
3. Гермогенов В.П., Вячислая 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 нанoeлектроники (Единое окно доступа к образовательным ресурсам). – URL: 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*):

- 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.