

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

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ:
Декан

А. Г. Коротаев

Рабочая программа дисциплины

Оптические свойства полупроводников

по направлению подготовки

03.03.03 Радиофизика

Направленность (профиль) подготовки :
Радиофизика, электроника и информационные системы

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
М.Л. Громов

Председатель УМК
А.П. Коханенко

Томск – 2025

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности;

ПК-1 Способен проанализировать поставленную задачу в области радиофизики и электроники, осуществлять поиск, обобщение и использование научно-технической информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональной задачи..

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности.

ИПК 1.1 Понимает требования, предъявляемые к исследуемому прибору, устройству или системе и ожидаемые результаты их использования.

2. Задачи освоения дисциплины

– Познакомить студентов с механизмами поглощения и излучения света в полупроводниках.

– Научиться применять понятийный аппарат оптики полупроводников для ... решения практических задач: анализа и интерпретации оптических спектров поглощения и излучательной рекомбинации полупроводниковых материалов.

3. Место дисциплины 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. Дисциплина входит в модуль Модуль «Твердотельная электроника».

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

Шестой семестр, экзамен

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: «Математический анализ», «Физика», «Введение в физику полупроводников», «Квантовая механика».

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 часов, из которых:

-лекции: 30 ч.

-семинар: 16 ч.

в том числе практическая подготовка: 0 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины, структурированное по темам

Тема 1. Оптические характеристики вещества

Оптические постоянные среды: показатель преломления и поглощения; коэффициенты поглощения, отражения и пропускания. Связь между оптическими постоянными. Соотношения Крамерса – Кронига. Основы классической и квантовой теорий дисперсии оптических постоянных. Методы определения оптических постоянных.

Тема 2. Собственное поглощение

Виды поглощения света в полупроводниках. Собственное поглощение. Вероятность межзонных оптических переходов. Прямые и не прямые, разрешенные и запрещенные переходы. Правила отбора. Край собственного поглощения в прямозонных и непрямоzonных полупроводниках. Функция оптической плотности. Влияние внешних полей на край собственного поглощения. Осцилляционное магнитопоглощение. Эффект Франца-Келдыша. Определение параметров полупроводника из спектров собственного поглощения. Основные отличия прямых и не прямых оптических переходов. Определение параметров полупроводника из спектров собственного поглощения.

Тема 3. Примесное поглощение

Энергетический спектр и волновые функции водородоподобных примесных состояний. Виды примесного поглощения. Влияние легирования на край собственного поглощения. Эффект Бурштейна-Мосса. Хвосты плотности состояний. Влияние концентрации примеси на спектры поглощения.

Тема 4. Поглощение и отражение света свободными носителями

Неселективное поглощение света. Плазменный и диамагнитный резонансы. Эффект Фарадея. Селективное поглощение света. Влияние сильных магнитных и электрических полей на спектры поглощения полупроводников.

Тема 5. Люминесценция

Виды люминесценции в полупроводниках. Излучательная рекомбинация «зона-зона». Темп излучательной рекомбинации. Время жизни. Теория Ван-Русбрека-Шокли. Зависимость времени жизни от температуры и уровня Ферми. Спектры излучательной рекомбинации. Примесная излучательная рекомбинация. Межпримесная излучательная рекомбинация на донорно-акцепторных парах. Влияние внешних факторов на процессы рекомбинации.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения устных и письменных опросов на семинарах, решения практических задач и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

Изучать материал курса рекомендуется последовательно, двигаясь от первой темы к последней. Раздел 1 «Оптические характеристики вещества» знакомит с основными понятиями и терминами, используемыми в курсе. В процессе обучения необходимо уяснить взаимосвязь между оптическими постоянными, используемыми для описания свойств материала, теорию дисперсии оптических постоянных в классической и квантово-механической интерпретации. Научиться на основе зонной диаграммы полупроводника прогнозировать возможные оптические переходы.

Изучая раздел 2 «Собственное поглощение» необходимо обратить особое внимание на отличия между прямыми и непрямыми оптическими переходами, понять разницу между разрешенными и запрещенными оптическими переходами. Научиться на основе зонной диаграммы полупроводника прогнозировать возможные оптические переходы в зависимости от типа внешнего воздействия (изменения температуры, давления, наличия внешнего электрического или магнитного поля).

После изучения разделов 3 «Примесное поглощение» и 4 «Поглощение и отражение света свободными носителями» обучающимся необходимо разобраться во влиянии концентрации примеси на распределение плотности состояний в зоне проводимости полупроводника и его влиянии на оптические свойства материала; знать и понимать разницу между селективным и неселективным поглощением электромагнитного излучения свободными носителями заряда.

В завершении курса знакомит студентов с процессами люминесценции. Изучая раздел 5 «Люминесценция» необходимо понимание основных терминов описывающих процессы рекомбинации в твердом теле, знать основные виды люминесценции и влияние температуры и положения уровня Ферми на время жизни свободных носителей заряда.

Для закрепления полученных знаний курс предполагает выполнение практических заданий и тестирования.

Примерный перечень вопросов для текущей аттестации

1. Какие виды процессов поглощения в полупроводниках существуют?
2. Какое поглощение в полупроводниках называется собственным?
3. Условия применения классической теории дисперсии оптических коэффициентов?
4. Соотношения Крамерса-Кронига.
5. В чем отличие прямых и непрямых оптических переходов?
6. Закон Брюстера.
7. Как формулируется закон Бугера и какое явление он описывает?
8. Какое поглощение в полупроводниках называется собственным?
9. Какие оптические переходы называются прямыми?
10. Какие оптические переходы называются разрешенными?
11. Какие оптические переходы называются запрещенными?
12. Чему равняется минимальная энергия фотона, необходимая для перехода электрона из валентной зоны на “пустой” уровень водородоподобного донора?
13. Какой формулой описывается край собственного поглощения в прямозонных полупроводниках с разрешенными оптическими переходами?
14. Какой формулой описывается край собственного поглощения в прямозонных полупроводниках с запрещенными оптическими переходами?
15. Какой формулой описывается край собственного поглощения в непрямозонных полупроводниках с разрешенными оптическими переходами при низких температурах?
16. Что называется спектром излучательной рекомбинации (люминесценции)?
17. Как зависит время жизни при межзонной излучательной рекомбинации от степени легирования полупроводника – от уровня Ферми?
18. Как зависит время жизни при межзонной излучательной рекомбинации от температуры?
19. Что такое температура Дебая?
20. Каково влияние легирования на край собственного поглощения?
21. Какова зависимость коэффициента поглощения от энергии электромагнитной волны для разрешенных и запрещенных прямых оптических переходов?
22. Суть эффекта Франца-Келдыша.
23. Суть эффекта Зинера.
24. Что такое плазменный резонанс?
25. Какие параметры могут быть извлечены из спектра поглощения?

26. В чем заключается эффект термализации неравновесных носителей заряда?
27. Что такое оже-рекомбинация?

Примеры задач для текущей аттестации

Задача 1. Поток света с длиной волны 100 мкм падает вертикально на поверхность материала, коэффициент отражения при этом составляет 0,36, а коэффициент пропускания 0,17 при толщине материала 1 мм. Найти линейный коэффициент поглощения материала.

Задача 2. В полупроводнике с вырожденной валентной зоной наблюдается поглощение электромагнитной волны с энергией 1,5 эВ. Определить энергию частиц, которые рождаются при поглощении кванта света, если ширина запрещенной зоны полупроводника $E_g=1,42$ эВ, эффективная масса электрона составляет $0,05m(0)$, эффективные массы легких и тяжелых дырок равны, соответственно $0,12m(0)$ и $0,49m(0)$. Закон дисперсии считать изотропным и параболическим.

Задача 3. Определить время жизни неравновесных носителей заряда в полупроводнике содержащем простые дефекты (локальные уровни), если известно, что уровень внешнего оптического возбуждения был низким, генерация неравновесных носителей заряда по всему объему была равномерной, концентрация неравновесных электрон-дырочных пар в момент времени $t(1)=0.1$ мс. после выключения оптической генерации была в 10 раз больше чем в момент времени $t(2)=1$ мс.

Задача 4. На полупроводниковую пластину, толщина которой много меньше линейного коэффициента поглощения ($\alpha=100$ см⁻¹), падает равномерное и стационарное освещение с интенсивностью 5×10^{15} см⁻²с⁻¹. Вычислить относительное изменение проводимости полупроводника, если рекомбинация неравновесных носителей заряда происходит на простых дефектах, их время жизни равно 2×10^{-4} с., равновесная концентрация носителей заряда равна 10^{15} см⁻³.

Задача 5. В n-Ge с концентрацией свободных электронов 4×10^{14} см⁻³ при температуре 150 К содержится 10^{14} см⁻³ центров рекомбинации с энергией активации $E_t=E_v+0,16$ эВ и коэффициентом захвата дырок 10^{-8} см³с⁻¹. Определить время жизни электронов и дырок при температуре 150 К в таком же образце с концентрацией центров рекомбинации 10^{12} см⁻³ в условиях низкого внешнего возбуждения, если известно, что $\Delta p_t/\Delta p=24$.

Примеры тем семинарских занятий

1. Классическая и квантовая теории дисперсии оптических постоянных.
2. Зависимость края собственного поглощения в непрямозонных полупроводниках от температуры.
3. Эффект Франца-Келдыша.
4. Зависимость края собственного поглощения света в алмазоподобных полупроводниках от внешних полей.
5. Примесное поглощение света в полупроводниках.

6. Плазменный резонанс. Плазмоны.
7. Эффект Бурштейна-Мосса.
8. Селективное поглощение света на свободных носителях.
9. Эффект Фарадея.
10. Определение параметров полупроводника из спектров собственного поглощения.
11. Спектры излучательной рекомбинации «зона-зона» в прямозонных и непрямозонных полупроводниках.
12. Зависимость времени жизни носителей заряда при излучательной рекомбинации «зона-зона» от температуры и степени легирования.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Экзамен в шестом семестре проводится в письменной форме по билетам. Экзаменационный билет включает два вопроса, первый из которых проверяет ИОПК 1.3 (применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности), второй проверяет ИПК 1.1 (понимает требования, предъявляемые к исследуемому прибору, устройству или системе и ожидаемые результаты их использования). Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Примерный перечень теоретических вопросов

1. Оптические постоянные среды: показатель преломления и поглощения, коэффициент поглощения. Коэффициенты отражения и пропускания.
2. Коэффициент пропускания света через пластинку с учетом многократного отражения. Закон Бугера.
3. Связь оптических и электрических коэффициентов твердого тела. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Формулы Крамерса-Кронига.
4. Формулы Френеля для отражения и преломления света на границе двух сред. Явление полного отражения. Закон Брюстера.
5. Формулы Френеля для отражения и преломления света на границе двух сред. Вывод формулы для коэффициента отражения при нормальном падении света на полубесконечную область
6. Коэффициент пропускания света через пластинку с учетом многократного отражения. Закон Бугера.
7. Основы классической теории дисперсии оптических коэффициентов. Условия применения классической теории.
8. Вывод формулы для вещественной и мнимой части диэлектрической проницаемости.
9. Прохождение света через тонкие пластинки и эпитаксиальные пленки. Условие резонансного прохождения. Определение толщины пленок оптическим методом.
10. Собственное поглощение света в полупроводниках. Прямые и не прямые, разрешенные и запрещенные оптические переходы. Правила отбора.

11. Край собственного поглощения в прямозонных полупроводниках. Функция оптической плотности состояний. Дисперсия коэффициента поглощения в случае разрешенных и запрещенных оптических переходов.
12. Край собственного поглощения в непрямоzonных полупроводниках.
13. Дисперсия коэффициента поглощения. Зависимость пороговой частоты от температуры.
14. Темп межзонной излучательной рекомбинации. Время жизни избыточных носителей заряда при межзонной излучательной рекомбинации.
15. Влияние легирования на край собственного поглощения: эффект Бурштейна-Мосса.
16. Влияние легирования на край собственного поглощения: хвосты плотности состояний.
17. Влияние температуры на край собственного поглощения. Температура Дебая.
18. Влияние магнитного поля на энергетический спектр носителей заряда в полупроводниках. Уровни Ландау.
19. Осцилляционное магнетопоглощение в прямозонных полупроводниках с разрешенными оптическими переходами. Функция оптической плотности состояний в магнитном поле.
20. Энергетический спектр носителей заряда в постоянном электрическом поле. Штарковская частота расщепления. Эффект Зинера.
21. Край собственного поглощения полупроводника в электрическом поле. Эффект Франца-Келдыша.
22. Неселективное поглощение света свободными носителями заряда. Зависимость коэффициента поглощения от частоты.
23. Дисперсия коэффициента отражения при взаимодействии света со свободными носителями заряда. Плазменный резонанс. Плазмоны.
24. Зависимость времени жизни межзонной излучательной рекомбинации от уровня Ферми.
25. Зависимость времени жизни межзонной излучательной рекомбинации от температуры.
26. Спектры межзонной излучательной рекомбинации в прямозонных и непрямоzonных полупроводниках. Эффект термализации неравновесных носителей заряда.
27. Примесная излучательная рекомбинация в прямозонных и непрямоzonных полупроводниках.

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

Компетенция	Индикатор компетенции	Критерии оценивания результатов обучения			
		Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности.	ИОПК-1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении и профессиональной деятельности.	Не имеет представления о механизмах поглощения, реализуемые в полупроводниковых материалах. Не имеет представления о влиянии внешних условий на процессы поглощения в полупроводниковых материалах.	Имеет общее представление о механизмах поглощения, реализуемые в полупроводниковых материалах. Имеет общее представление о влиянии внешних условий на процессы поглощения в полупроводниковых материалах.	Допускает отдельные неточности в описании механизмов поглощения, реализуемые в полупроводниковых материалах. Допускает отдельные неточности в описании влияния внешних условий на процессы поглощения в полупроводниковых материалах.	Имеет полное представление о механизмах поглощения, реализуемые в полупроводниковых материалах. Имеет полное представление о влиянии внешних условий на процессы поглощения в полупроводниковых материалах.
ПК-1 Способен проанализировать поставленную задачу в области радиофизики и электроники, осуществлять поиск, обобщение и использование научно-технической информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональной задачи.	ИПК-1.1 Понимает требования, предъявляемые к исследуемому прибору, устройству или системе и ожидаемые результаты их использования.	Не умеет анализировать спектры поглощения и люминесценции и полупроводниковых материалов.	Неполные знания принципов анализа спектров поглощения и люминесценции полупроводниковых материалов.	В целом успешно, но с отдельными пробелами анализирует спектры поглощения и люминесценции полупроводниковых материалов.	Уверенное владение анализом спектров поглощения и люминесценции полупроводниковых материалов.

11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/enrol/index.php?id=9943>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине (п. 9, 10).

в) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов (п. 9).

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. 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>
2. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников / Ю.И. Уханов; Под ред. В.М. Тучкевича. - М. : Наука, 1977. - 366 с.
4. 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>
5. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках / Ж. Панков ; пер. с англ. под ред. Ж.И. Алферова, В.С. Вавилова. - Москва: Мир, 1973. - 456 с.
6. 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., 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. Демонстрационные модели свойств полупроводников и полупроводниковых приборов (Purdue University, Gerhard Klimeck, Benjamin P Haley): электронный ресурс. – URL: <https://nanohub.org/resources/6842>
6. Технология микро- и нанoeлектроники (Единое окно доступа к образовательным ресурсам). – URL: http://window.edu.ru/catalog/resources?p_rubr=2.2.75.26.43

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

13. Перечень информационных технологий

- а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:
– Microsoft Office 2010 Russian Academic Open, Microsoft Windows Professional 7 Academic Open (Лицензия №47729022 от 26.11.2010);
– электронный учебный курс на базе виртуальной обучающей среды MOODLE;

- 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:
1. Новые полупроводниковые материалы. Характеристики и свойства: база данных ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. – URL: <http://www.matprop.ru/>
2. Справочник по электронным компонентам. – URL: <http://kazus.ru/>
3. Электронные компоненты: каталог товаров группы компаний «Промэлектроника». – URL: <http://www.promelec.ru/>
4. eLIBRARY.RU: Научная электронная библиотека. – URL: <https://elibrary.ru/defaultx.asp?>
5. Электронно-библиотечная система «Лань» (доступ из сети НИ ТГУ). – URL: <http://e.lanbook.com/>
6. Scopus: база данных цитирования издательства Elsevier (доступ из сети НИ ТГУ). – URL: <http://www.scopus.com/>
7. Web of Science: база данных цитирования компании Clarivate Analytics (доступ из сети НИ ТГУ). – URL: <http://webofknowledge.com/WOS>
8. Светодиоды (иллюстрации Ф. Шуберта): электронный ресурс. – URL: <https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/>

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.
Аудитории для проведения занятий лекционного и семинарского типа индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешанном формате («Актру»).

15. Информация о разработчиках

- Новиков Вадим Александрович, к.ф.-м.н., радиофизический факультет НИ ТГУ, доцент.