

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

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан
А. Г. Коротаев

Рабочая программа дисциплины

Низкоразмерные структуры в фотонике

по направлению подготовки

12.04.03 Фотоника и оптоинформатика

Направленность (профиль) подготовки:
Приборы и устройства нанофотоники

Форма обучения
Очная

Квалификация
Магистр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
А.П. Коханенко

Председатель УМК
А.П. Коханенко

Томск – 2025

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен представлять современную научную картину мира, выявлять естественнонаучную сущность проблемы, формулировать задачи, определять пути их решения и оценивать эффективность выбора и методов правовой защиты результатов интеллектуальной деятельности с учетом специфики исследований и разработки приборов и систем, технологий производства оптических сред, материалов и устройств фотоники и оптоинформатики.

ОПК-3 Способен приобретать и использовать новые знания в своей предметной области на основе информационных систем и технологий, предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач.

ПК-1 Способен к анализу состояния научно-технической проблемы, технического задания и постановке цели и задач проводимых научных исследований на основе подбора и изучения литературных и патентных источников.

ПК-2 Способность к построению математических моделей объектов исследования и выбору численного метода их моделирования, разработке нового или выбору готового алгоритма решения задачи.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 1.1 Представляет современную научную картину мира, выявляет естественнонаучную сущность проблемы

ИОПК 3.1 Осуществляет информационный поиск и использует новые знания в своей предметной области

ИПК 1.1 Составляет план поиска научно-технической информации по разработке оптических систем связи

ИПК 1.3 Представляет информацию в систематизированном виде, оформляет научно-технические отчёты

ИПК 2.2 Определяет выходные параметры и функции разрабатываемой оптической системы связи, которые должны быть определены в результате моделирования его функционирования на основе физических процессов и явлений

1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины **Низкоразмерные структуры в фотонике** являются:

- ознакомление обучающихся с современными представлениями в области физики полупроводниковых наноструктур и их практическом применении в фотонике;
- формирование системы взглядов на роль нанoeлектроники и нанофотоники в развитии современного приборостроения.

2. Место дисциплины в структуре магистерской программы

Данная дисциплина относится к вариативной части Блока 1 «Дисциплины (модули) профессионального цикла магистерской программы **Приборы и устройства нанофотоники**.

Для освоения дисциплины студент должен обладать:

- способностью использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования;
- способностью владеть методикой разработки математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов в области микро и наноэлектроники;
- способностью оценивать научную значимость и перспективы прикладного использования результатов исследования;
- способностью проектировать микроэлементы и микроустройства, основанные на различных физических принципах действия;

- способностью разрабатывать элементы и устройства фотоники и оптоинформатики на основе существующей элементной базы микро и нанoeлектроники.

От студента требуется знания из общей физики, физики твердого тела, квантовой механики, нелинейной оптики и оптического материаловедения, приобретенные в процессе бакалаврской подготовки.

Освоение данной дисциплины необходимо для проведения научно-исследовательской работы в области нанofотоники.

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Способность к абстрактному мышлению, обобщению, анализу, систематизации и прогнозированию (ОК-1);

способность действовать в нестандартных ситуациях, нести ответственность за принятые решения (ОК-2);

способность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала (ОК-3);

способность формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки (ОПК-1);

способность применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы (ОПК-2);

способность использовать иностранный язык в профессиональной сфере (ОПК-3);

готовность обосновать актуальность целей и задач проводимых научных исследований (ПК-1);

способность владеть методикой разработки математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере (ПК-2);

способность оценивать научную значимость и перспективы прикладного использования результатов исследования (ПК-3);

способность владеть навыками компьютерного моделирования информационных сигналов и систем, синтеза кодов, количественного анализа характеристик информационных систем (ПК-4);

способность владеть приемами практического решения задач выбора и оценки эффективности различных архитектурных и структурных решений при компьютерном моделировании (ПК-5);

способность применять современные методики исследования основных физико-химических свойств оптических стекол и кристаллов, методики прогнозирования оптических и физико-химических параметров новых материалов (ПК-7);

способность разрабатывать фотонное устройство на основе элементной базы, выбирать необходимое оборудование и способ контроля параметров устройства (ПК-8);

способность владеть процедурами защиты интеллектуальной собственности (ПК-10);

способность готовить и согласовывать технические задания на проектные разработки (ПК-12);

способность участвовать в монтаже, наладке, испытаниях и сдаче в эксплуатацию опытных образцов (ПК-17);

способность оценивать инновационно-технологические риски при внедрении новых технологий (ПК-21);

готовность обосновать актуальность целей и задач проводимых научных исследований в области разработки, производства и эксплуатации приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурированных материалов, а также контроля их параметров (ПСК-1);

способность владеть методикой разработки математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов в области разработки, производства и

эксплуатации приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурированных материалов, а также контроля их параметров (ПСК-2);

способность оценивать научную значимость и перспективы прикладного использования результатов исследования в области разработки, производства и эксплуатации приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурированных материалов, а также контроля их параметров (ПСК-3);

способность применять современные методики исследования и прогнозирования оптических и физико-химических свойств наноструктурированных материалов (ПСК-4);

способность разрабатывать фотонное устройство, использующее элементную базу на основе наноструктурированных материалов, выбирать необходимое оборудование и способ контроля параметров устройства (ПСК-5);

способность участвовать в монтаже, наладке, испытаниях и сдаче в эксплуатацию опытных образцов, использующих элементную базу на основе наноструктурированных материалов (ПСК-7).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **Знать:**

базовые концепции физики низкоразмерных электронных систем как междисциплинарной дисциплины, развивающейся на самом передовом рубеже современной физики твердого тела;

основные закономерности взаимодействия электромагнитных полей с низкоразмерными системами;

основные направления практического применения уникальных физических характеристик наноструктур в оптоэлектронике.

- **Уметь:**

строить математические модели низкоразмерных электронных систем и анализировать эти модели;

рассчитывать оптические спектры квантово-размерных структур, адекватно интерпретировать и обобщать полученные результаты.

- **Владеть:**

методами оценки параметров реализуемых устройств нанофотоники;

методами проектирования приборов наноэлектроники и нанофотоники.

4. Структура и содержание дисциплины

1. Энергетические диаграммы полупроводников и полупроводниковых структур с изменяющимся по координате химическим составом.

Классификация полупроводников и структур на их основе. Неоднородные полупроводники и гомоструктуры. Варизонные полупроводники и гетероструктуры. Модели гетероперехода. Энергетическая диаграмма гетероструктуры. Изотипные и анизотипные гетероструктуры.

2. Оптические свойства полупроводниковых гетероструктур.

Фотоэлектрические явления в полупроводниках и гетероструктурах. Фотоэлектромагнитный эффект. Оже-рекомбинация. Излучательная рекомбинация. Эффекты увлечения носителей тока фотонами. Разогрев и охлаждение носителей заряда светом.

3. Использование варизонных слоев и гетероструктур в оптоэлектронных приборах.

Приборные структуры с варизонными слоями. Гетероструктуры в полупроводниковой электронике. Светоизлучающие приборы на основе гетероструктур. Фотоприемники на основе гетероструктур.

4. Электроны, фононы и экситоны в наноструктурах.

Принципы размерного квантования. Размерное квантование электронных состояний в квантовых ямах. Квантовые нити и квантовые точки. Электроны, фононы и фотоны в сверхрешетке. Структуры с двумерным электронным газом. Структуры с одномерным

электронным газом. Структуры с нульмерным электронным газом. Структуры с вертикальным переносом. Плотность состояний в электронных системах пониженной размерности. Статистика носителей заряда в низкоразмерных структурах. Примесные состояния и экситоны в низкоразмерных структурах. Явления переноса электронов в квантово-размерных полупроводниковых структурах. Резонансное туннелирование через квантовую яму. Вольтамперные характеристики приборов с резонансным туннелированием. Квантовые осцилляции в магнитном поле. Квантовый эффект Холла. Точечные константы в системах с двумерным электронным газом. Эффекты квантования в туннельных контактах. Кулоновская блокада туннелирования.

5. Оптические свойства наноструктур.

Правила отбора при оптических переходах. Междзонные и внутризонные (межподзонные) оптические переходы между подзонами размерного квантования. Поляризационные свойства оптических переходов из подзон тяжелых и легких дырок. Резонансное отражение и поглощение света в структурах с квантовыми ямами. Оптическая ионизация квантовых ям. Оптические переходы между минизонами в сверхрешетках. Квантовые нити и точки. Энергетическая структура электронных возбуждений. Фононные и электрон-фононные состояния квантовых точек. Элементарные возбуждения квантовой точки. Оптическая спектроскопия квантовой точки. Баллистическая проводимость нитей и квантование проводимости в нитях. Кулоновская блокада. Фононы в сверхрешетках и квантовых ямах: сложенные акустические и квантованные моды. Рамановское рассеяние на фононах в сверхрешетках и множественных квантовых ямах.

6. Фотолюминесценция наноструктур.

Особенности фотолюминесценции структур с квантовыми ямами. Поляризованная люминесценция и тонкая структура экситонных уровней. Квантовые биения. Фотолюминесценция локализованных экситонов в режиме многократных туннельных прыжков. Энергетическая релаксация локализованных экситонов.

7. Рассеяние света в наноструктурах.

Осцилляторная модель рассеяния света. Резонансная флуоресценция двухуровневых систем. Рассеяние света на междзонных возбуждениях. Рассеяние света на размерно-квантованных оптических фононах в сверхрешетках. Двойной оптический резонанс.

8. Нелинейная оптика и многоволновое оптическое смешивание в наноструктурах.

Нелинейность типа насыщения двухуровневых переходов. Нелинейность ангармонического типа. Биэкситонный механизм нелинейности.

9. Фотоэлектрические явления в наноструктурах.

Поглощение света при междзонных переходах типа «уровень-уровень», «уровень-сплошной спектр». Туннельный выброс электронов из квантовой ямы. Кинетика захвата электронов в квантовую яму. Оже-рекомбинация в квантовых ямах с участием фононов. Фотопроводимость при разогреве светом двумерного электронного газа в квантовых ямах (нерезонансная, резонансная).

10. Применение низкоразмерных структур в приборах оптоэлектроники.

Лазеры с квантовыми ямами и точками. Оптические модуляторы. Фотоприемники на множественных квантовых ямах, точках и сверхрешетках. Фотоприемники на гетероструктурах с квантовыми точками. Лавинные фотодиоды с системой квантовых ям. Резонансно-туннельные транзисторы на квантовой точке. Одноэлектронный транзистор. Квантово-точечные клеточные автоматы и беспроводная электронная логика.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы 108 часов

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				лекции	Лаб. работы	семина ры	Самост. работа	
1	Энергетические диаграммы полупроводников и полупроводниковых структур с изменяющимся по координате химическим составом	1	1	2	-	2	8	Устный опрос
2	Оптические свойства полупроводниковых гетероструктур	1	1-2	2	-	2	8	Устный опрос
3	Использование варизонных слоев и гетероструктур в оптоэлектронных приборах	1	2-4	1	-	2	8	Устный опрос
4	Электроны, фононы и экситоны в наноструктурах	1	4-6	1	-	2	6	Устный опрос
5	Оптические свойства наноструктур	1	6-8	1	-	2	6	Устный опрос
6	Фотолюминесценция наноструктур	1	8-10	1	-	2	6	Устный опрос
7	Рассеяние света в наноструктурах	1	10-12	1	-	2	6	Устный опрос
8	Нелинейная оптика и многоволновое оптическое смешивание в наноструктурах	1	12-14	1	-	2	6	Устный опрос
9	Фотоэлектрические явления в наноструктурах	1	14-16	1	-	2	6	Устный опрос
10	Применение низко-размерных структур в приборах оптоэлектроники	1	16-18	1	-	6	12	Устный опрос
ИТОГО				12	-	24	72	

5. Образовательные технологии

При реализации дисциплины используются проблемные лекции и лекции-дискуссии. При проведении семинаров предусматривается участие ведущих специалистов НОЦ «Функциональные материалы радио- и оптоэлектроники».

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

Видами самостоятельной работы обучающегося по данной дисциплине являются:

- подготовка ответов на контрольные вопросы;
- подготовка докладов на семинарах;
- подготовка к зачету.

Темы семинаров

1. Влияние размерности электронного газа на свойства квантовых структур.
2. Оптические свойства квантовых ям, нитей и точек.
3. Оже-рекомбинация в квантовых ямах.
4. Излучательная рекомбинация в структурах с квантовыми ямами.
5. Особенности фотолюминесценции структур с квантовыми ямами.
6. Рассеяние света на размерно-квантованных оптических фонах в сверхрешетках.
7. Механизмы нелинейности в квантово-размерных структурах.
8. Фотопроводимость в квантовых ямах.
9. Квантовый эффект Холла.
10. Светоизлучающие приборы на основе гетероструктур.
11. Фотоприемники на основе гетероструктур.
12. Перспективы применения низкоразмерных структур в оптоэлектронике.

Перечень контрольных вопросов для самостоятельной работы

1. Неоднородные полупроводники и гомоструктуры.
2. Варизонные полупроводники. Гетероструктуры.
3. Модели гетероперехода.
4. Построение энергетической диаграммы гетероструктуры.
5. Точки в гетероструктурах.
6. Приборные структуры с варизонными слоями.
7. Механизмы рекомбинации в гетероструктурах.
8. Фотоэффекты в гетероструктурах.
9. Эффект фотонного увлечения носителей заряда.
10. Принципы размерного квантования.
11. Условия наблюдения квантовых размерных эффектов.
12. Структуры с двумерным электронным газом.
13. Структуры с одномерным электронным газом.
14. Структуры с нульмерным электронным газом.
15. Структуры с вертикальным переносом.
16. Плотность состояний в электронных системах пониженной размерности.
17. Статистика носителей в низкоразмерных структурах.
18. Время релаксации и подвижность в двумерных системах.
19. Механизмы рассеяния носителей в двумерных системах.
20. Баллистический транспорт.
21. Вертикальный перенос в системе квантовых ям.
22. Резонансное туннелирование в квантовых ямах.
23. Межзонное поглощение в квантовых ямах.
24. Межуровневые переходы.
25. Оптическая ионизация квантовых ям.
26. Оптические переходы между минизонами в сверхрешетках.
27. Фотолюминесценция структур с квантовыми ямами.

28. Основная идея квантовых биений.
29. Классификация механизмов рассеяния света.
30. Осцилляторная модель рассеяния света.
31. Рассеяние света в сверхрешетках.
32. Механизмы оптической нелинейности.
33. Захват носителей в квантовую яму.
34. Выброс электронов из квантовой ямы.
35. Поглощение света и фотопроводимость структур с квантовыми ямами.
36. Фотопроводимость связанная с разогревом двумерного электронного газа.
37. Классификация оптических приборов на основе структур с квантовыми ямами и точками.
38. Перспективы развития нанофотоники.
39. Типы сверхрешеток и особенности их применения в оптоэлектронике.

Примерный перечень вопросов к зачету

1. Классификация полупроводников и структур на их основе. Неоднородные полупроводники и гомоструктуры.
2. Варизонные полупроводники и гетероструктуры. Модели гетероперехода. Энергетическая диаграмма гетероструктуры. Изотипные и анизотипные гетероструктуры.
3. Приборные структуры с варизонными слоями.
4. Гетероструктуры в полупроводниковой электронике.
5. Светоизлучающие приборы на основе гетероструктур.
6. Фотоприемники на основе гетероструктур.
7. Принципы размерного квантования.
8. Условия наблюдения квантовых размерных эффектов.
9. Структуры с двумерным электронным газом.
10. Структуры с одномерным электронным газом.
11. Структуры с нуль-мерным электронным газом.
12. Структуры с вертикальным переносом.
13. Плотность состояний в электронных системах пониженной размерности.
14. Статистика носителей в низкоразмерных структурах.
15. Оптическое пропускание и отражение полупроводниковых гетероструктур. Общие соотношения для коэффициента поглощения в одноэлектронном приближении.
16. Внутризонные оптические переходы в квантовых ямах. Анизотропия диэлектрической проницаемости и двойное лучепреломление.
17. Межподзонные переходы электронов.
18. Межподзонные переходы дырок.
19. Оптические переходы между минизонами в сверхрешетках.
20. «Фотоионизация» квантовых ям или переходы «уровень-сплошной спектр».
21. Межзонные оптические переходы в квантовых ямах.
22. Кинетические эффекты в двумерных системах. Время релаксации и подвижность. Механизмы рассеяния.
23. Баллистический транспорт. Приборы на основе баллистического транспорта.
24. Вертикальный перенос в системе квантовых ям. Полевая ионизация одиночной ямы. ВАХ сверхрешеток.
25. Энергетический спектр и плотность состояний двумерных систем в магнитном поле. Кинетические явления в сильных магнитных полях.
26. Целочисленный и дробный КЭХ.
27. Баллистическая проводимость нитей. Связь КЭХ с квантованием проводимости в нитях.

28. Резонансное туннелирование. Резонансно-туннельный транзистор на квантовой точке.
29. Кулоновская блокада. Одноэлектронный транзистор и устройства на его основе.
30. Транзисторы с высокой подвижностью носителей и транзисторы на горячих электронах.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература

1. Войцеховский А. В., Ижнин И. И., Савчин В. П., Вакив Н. М. Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники. – Томск: Издательский Дом ТГУ, 2013. - 560 с.
2. Оптика и фотоника. Принципы и применения Т. 1: [учебное пособие: в 2 т.] / Б. Салех, М. Тейх; пер. В. Л. Дербова. - Долгопрудный: Интеллект, 2012. - 759 с.
3. Оптика и фотоника. Принципы и применения Т. 2: [учебное пособие: в 2 т.] / Б. Салех, М. Тейх; пер. В. Л. Дербова. - Долгопрудный: Интеллект, 2012. - 780 с.
4. Игнатов А. Н. Оптоэлектроника и нанофотоника. - СПб: Лань, 2011. - 538 с.
5. Основы физики полупроводников. Нанопизика и технические приложения / М. Грундман; пер. с англ. под ред. В. А. Гергеля. - Москва: Физматлит, 2012. - 771 с.

б) дополнительная литература

1. Ильин В.И., Мусихин С.Ф., Шик А.Я. Варизонные полупроводники и гетероструктуры. - СПб.: Наука, 2000. - 100 с.
2. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика наноразмерных систем. - СПб.: Наука, 2001. - 160 с.
3. Воробьев Л.Е., Ивченко Е.Л., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А. Оптические свойства наноструктур. Учебное пособие. - СПб.: Наука, 2001. - 188 с.
4. Воробьев Л.Е., Данилов С.Н., Зегря Г.Г., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А., Ясенович И.Н., Берегулин Е.В. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и размерно-квантовых структурах. Учебное пособие. - СПб.: Наука, 2001. - 248 с.
5. Гапоненко С.В., Розанов Н.Н., Ивченко Е.Л., Федоров А.В., Бонч-Бруевич А.М., Вартанян Т.А., Пржибельский С.Г. Оптика наноструктур. - СПб.: Недра, 2005. - 326 с.
6. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. М.: Техносфера, 2004. - 592 с.
7. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2005. - 336 с.
8. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2005. - 134 с.
9. Кравченко А.Ф., Овсяк В.Н. Электронные процессы в твердотельных системах пониженной размерности. Новосибирск: НГУ, 2000. - 448 с.
10. Гуртов В.А. Твердотельная электроника. Учебное пособие. М.: Техносфера, 2005. - 180 с.
11. Войцеховский А.В., Кульчицкий Н.А., Средин В.Г. Оптоэлектронные приборы на квантово-размерных структурах. Учебное пособие. М.: Изд. Мин. Обороны, 2000. - 176 с.
12. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. - 240 с.
13. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры. Пер. с англ. под ред. Л. Ченга, К. Плога. М.: Мир, 1989. - 584 с.
14. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы нанoeлектроники. Учебное пособие. Новосибирск: НГТУ, 2004. - 496 с.

в) Интернет-ресурсы

1. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU: <http://elibrary.ru/>
2. Электронная библиотека ТГУ: <http://www.lib.tsu.ru/ru>

3. Электронный ресурс SPIE Digital Library: <http://www.spiedigitallibrary.org>
4. Электронный ресурс ScienceDirect: <http://www.sciencedirect.com/>
5. Электронный ресурс SpringerLink: <http://link.springer.com/>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

При освоении дисциплины используются видеофильмы и презентации по отдельным разделам дисциплины, компьютерные классы РФФ ТГУ с доступом к ресурсам Научной библиотеки ТГУ, в том числе отечественным и зарубежным периодическим изданиям, и сети Интернет.