

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра физики полупроводников**



**Рабочая программа дисциплины
ОПТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

направление подготовки: **03.04.02 Физика**
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения
Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	72	22	10		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н.

И. Б. Логашенко

Новосибирск, 2022

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	5
5. Перечень учебной литературы.	7
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	7
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	8
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	8
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	8
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	9

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Цель учебного курса «Оптические процессы в полупроводниках» – дать магистрантам базовые знания, умения и навыки по основам физики взаимодействия электромагнитного излучения с твердыми телами, ознакомить с оптическими методами исследования полупроводников, а также с современными полупроводниковыми фотоприемниками и светоизлучающими приборами.

Для достижения поставленной цели выделяются следующие задачи курса:

1. Овладение феноменологическим и микроскопическим подходами к описанию оптических свойств кристаллов полупроводников, диэлектриков и металлов.
2. Изучение круга оптических и фотоэлектрических явлений, используемых для исследования энергетического спектра кристаллов и процессов релаксации различных квазичастиц – электронов и дырок, экситонов, фононов, а также определения параметров полупроводников и полупроводниковых структур.
3. Ознакомление с физическими принципами работы приборов, основанных на оптических и фотоэлектрических явлениях в полупроводниках: полупроводниковых излучателей света, фотоприемников и фотокатодов.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p>ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p>ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> <p>ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p>Знать основы физики взаимодействия электромагнитного излучения с полупроводниками, диэлектриками и металлами; микроскопические механизмы поглощения света в полупроводниках; основные оптические, фотоэлектрические и фотоэмиссионные явления в полупроводниках и физические принципы работы фотоприемников и светоизлучающих приборов, построенных на этих явлениях.</p> <p>Уметь объяснять микроскопические механизмы оптических явлений в полупроводниках; отвечать на контрольные вопросы по курсу; решать задачи по оптике полупроводников на уровне сложности задания; выбирать оптические и фотоэлектрические методы определения различных параметров полупроводников.</p> <p>Владеть навыками постановки и решения задач научных исследова-</p>

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		ний в области физики оптики полупроводников с помощью современных спектроскопических методов; навыками описания оптических свойств сплошных сред, в том числе диэлектриков, полупроводников и металлов, а также пределов применимости этих способов описания; современных спектроскопических методов исследования объемных полупроводников и полупроводниковых микроструктур.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Оптические процессы в полупроводниках» реализуется в осеннем семестре для обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой физики полупроводников. Для успешного освоения курса «Оптические процессы в полупроводниках» магистранты должны обладать предварительными знаниями электродинамики, квантовой механики, статистической физики в объеме бакалавриата физического факультета НГУ. В свою очередь, учебный курс «Оптические процессы в полупроводниках» предоставляет магистрантам теоретические знания и практические навыки, необходимые для обучения в аспирантуре по специальностям "физика полупроводников" и "физика конденсированного состояния", а также для успешного использования оптических и фотоэлектрических методов исследования полупроводниковых материалов и наноструктур в проводимой исследовательской работе.

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	72	22	10		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов

работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, консультации, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: контрольные вопросы, коллоквиум, задачи для самостоятельного решения;
- промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 22 часа;
- практические занятия – 10 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 22 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, консультации, экзамен) составляет 36 часов.

4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Феноменологическое описание оптических свойств кристаллов.	1-2	6	4		2	
2.	Механизмы поглощения света в полупроводниках.	3-7	16	6	4	6	
3.	Процессы с участием неравновесных носителей заряда.	8-11	12	6	2	4	
4.	Оптические процессы в полупроводниковых микроструктурах.	12-13	6	2	2	2	
5.	Оптические методы исследования полупроводников	14-16	10	4	2	4	
6.	Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18				18
7.	Консультации перед экзаменом		2				2
8.	Экзамен		2				2
Всего			72	22	10	18	22

Программа и основное содержание лекций (22 часа)

Раздел 1. Феноменологическое описание оптических свойств кристаллов (4 часа).

Тензор диэлектрической проницаемости, его связь с симметрией кристалла. Классическая теория дисперсии оптических характеристик. Модель Лоренца. Нелинейно-оптические явления в кристаллах. Отражение, преломление, поглощение и интерференция света в полупроводниках. Изменение состояния поляризации света при отражении и преломлении. Эллипсометрия. Пределы применимости феноменологического описания оптических свойств.

Раздел 2. Механизмы поглощения света в полупроводниках (6 часов).

Межзонные оптические переходы. Прямые и непрямые переходы. Влияние кулоновского взаимодействия электронов и дырок (экситонные эффекты). Поляритоны. Поглощение света на фононах. Внутризонные переходы. Переходы примесь-зона. Влияние внешних воздействий (температуры, давления, электрического и магнитного полей) на поглощение света. Эффект Франца-Келдыша. Магнитооптические явления. Поглощение света в сильнолегированных и неупорядоченных полупроводниках.

Раздел 3. Процессы с участием неравновесных носителей заряда (6 часов).

Фотоэлектрические явления на баллистических, горячих и термализованных неравновесных носителях заряда. Релаксация импульса и энергии. Время жизни. Диффузия и дрейф. Фотопроводимость и фотоэдс. Полупроводниковые фотоприемники. Внешний фотоэффект. Определение работы выхода электронов из полупроводника. Активирование поверхности до состояния с эффективным отрицательным электронным средством. Полупроводниковые фотокатоды. Фотоэмиссия электронов, поляризованных по спину. Излучательная рекомбинация неравновесных носителей заряда. Переходы зона-зона и примесь-зона. Горячая фотолюминесценция. Полупроводниковые светодиоды и лазеры.

Раздел 4. Оптические процессы в полупроводниковых микроструктурах (2 часа).

Поглощение и излучение света в полупроводниковых квантовых ямах. Правила отбора. Инфракрасные фотоприемники и электрооптические модуляторы на структурах с квантовыми ямами. Поглощение света и транспорт электронов в легированных и композиционных полупроводниковых сверхрешетках. Локализация Ванье-Штарка.

Раздел 5. Оптические методы исследования полупроводников (4 часа).

Фотолюминесценция. Идентификация типов оптических переходов и химической природы примесей. Измерение времени жизни. Комбинационное рассеяние света. Рассеяние на оптических и акустических фононах. Электронное комбинационное рассеяние. Фотоэлектрическая спектроскопия полупроводниковых структур. Определение порогов оптических переходов и рекомбинационных параметров неравновесных носителей заряда. Методы модуляционной спектроскопии полупроводников. Электропоглощение, электроотражение и фотоотражение. Оптические методы исследования поверхности полупроводников. Анизотропное отражение поляризованного света. Фотоэмиссионная спектроскопия.

Программа практических занятий (10 часов)

Занятие 1. Микроскопические механизмы поглощения света в полупроводниках. Иллюстрация межзонных оптических переходов в прямозонных и непрямозонных полупроводниках на зонных диаграммах энергия – координата и энергия – квазиимпульс. Вычисление спектра формы

межзонного поглощения в прямозонном полупроводнике. Построение зонных диаграмм для переходов с участием фононов, примесей и свободных носителей заряда (решение задач). (2 часа)

Занятие 2. Феноменология и микроскопика влияния внешних воздействий на оптические свойства полупроводников (1 час).

Занятие 3. Контрольная работа (письменный тест) по разделам 1 и 2. (1 час)

Занятие 4. Фотоэлектрические и фотоэмиссионные явления в полупроводниках. Определение времени жизни неравновесных носителей заряда по кинетике фотопроводимости и фотолюминесценции. Построение зонной диаграммы и обсуждение особенностей работы фотоэмиттеров с отрицательным электронным средством (2 часа).

Занятие 5. Оптические процессы в полупроводниковых микроструктурах. Построение зонных диаграмм и анализ оптических переходов в полупроводниковых сверхрешетках. Квантово-размерный эффект Штарка. (2 часа).

Занятие 6. Оптические методы исследования полупроводников. Анализ возможностей различных методов оптической и фотоэмиссионной спектроскопии для определения электронной структуры полупроводников (1 час).

Занятие 7. Коллоквиум (1 час).

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям	6
Подготовка заданий для самостоятельного решения	6
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	6
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990. – 685 с., ISBN 5-02-014032-5 (39 экз.)
2. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников: [Учеб. пособие для физ. спец. вузов] / А.И. Ансельм. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука., 1978. 615 с. (33 экз.)
3. А.В. Ненашев, В.Л. Альперович Колебания кристаллической решетки: учебное пособие: [для студентов и аспирантов физических специальностей вузов]; М-во образования и науки РФ, Новосиб. гос. ун-т, Физ. фак. Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2015. 98 с., ISBN 978-5-4437-0417-3 (21 экз.)
4. Оптические свойства наноструктур: учебное пособие для вузов / Л.Е. Воробьев, Е.Л. Ивченко, Д.А. Фирсов, В.А. Шалыгин. СПб.: Наука, 2001. 187 с., ISBN 5-02-024 (14 экз.)
5. Пихтин, Александр Николаевич. Оптическая и квантовая электроника: Учебник для вузов по направлению "Электроника и микроэлектроника" / А.Н. Пихтин, М.: Высш. шк., 2001. 573 с., ISBN 5-06-002703-1 (5 экз.)

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

6. В.Л. Альперович. Оптические процессы в полупроводниках Программа курса, вопросы к коллоквиуму, задание, рекомендованная литература. (Интернет-ресурс: <https://cloud.mail.ru/public/2oT6/8nHTEvqVF>).
7. В.Л. Альперович. Дополнительные вопросы и комментарии к программе кандидатского экзамена по физике полупроводников. Методические указания, схема ответов по наиболее сложным разделам, контрольные вопросы, задачи, рекомендованная литература. (Интернет-ресурс: <https://cloud.mail.ru/public/52wg/Wk9FeYP8C>).

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.1 Современные профессиональные базы данных

New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties. Электронный архив ФТИ им. А.Ф. Иоффе: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/> (свободный доступ)
<http://e-lib.nsu.ru/dsweb/Get/Resource-291/page001.pdf> (свободный доступ)

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль успеваемости

Текущий контроль успеваемости осуществляется в ходе семестра путем опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции, проведения коллоквиума, а также на практических занятиях при решении студентом задач, рекомендованных для практических занятий и домашних заданий, обсуждаются идеи и способы решения. Одновременно с этим проводятся индивидуальные консультации обучающихся.

Промежуточная аттестация

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Он проводится в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области оптических процессов в полупроводниках и приборах полупроводниковой оптоэлектроники в профессиональной деятельности.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации. Критерии и шкалы оценивания индикаторов достижения результатов обучения отражены в Таблице 10.2.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики	Знать основы физики взаимодействия электромагнитного излучения с полупроводниками, диэлектриками и металлами; микроскопические механизмы поглощения света в полупроводниках; основные оптические, фотоэлектрические и фотоэмиссионные явления в полупроводниках и физические принципы работы фотоприемников и светочувствительных приборов, построенных на этих явлениях.	Опрос в начале каждой лекции, проведение коллоквиума, экзамен.

объекта исследования.		
ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	<p>Уметь объяснять микроскопические механизмы оптических явлений в полупроводниках; отвечать на контрольные вопросы по курсу; решать задачи по оптике полупроводников на уровне сложности задания; выбирать оптические и фотоэлектрические методы определения различных параметров полупроводников.</p> <p>Владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области физики оптики полупроводников с помощью современных спектроскопических методов; навыками описания оптических свойств сплошных сред, в том числе диэлектриков, полупроводников и металлов, а также пределов применимости этих способов описания; современных спектроскопических методов исследования объемных полупроводников и полупроводниковых микроструктур.</p>	Опрос в начале каждой лекции, проведение коллоквиума, экзамен.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Оптические процессы в полупроводниках».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.

Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.2	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.
-----------------------------------	--------	--	--	--	---

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Перечень контрольных вопросов

1. Как изменится состояние поляризации линейно-поляризованного света после отражения от поверхности полупроводника?
2. Оценить толщину диэлектрического просветляющего покрытия, нанесенного на GaAs, для излучения гелий-неонового лазера.
3. В модели Лоренца проанализировать дисперсию показателей преломления и поглощения для случая двух типов осцилляторов с различными резонансными частотами. Построить соответствующие графики, обращая внимание на асимптотическое поведение показателя преломления при частотах вдали от резонансов. Можно ли использовать такую модель для описания оптических свойств полупроводников?
4. Как зависит ширина запрещенной зоны в GaAs от температуры? От гидростатического давления? Объяснить влияние температуры и давления на ширину запрещенной зоны исходя из зависимости энергии уровней в кристалле от расстояния между атомами.
5. Чем определяется ширина и форма длинноволновых «хвостов» в спектрах поглощения и фотoluminesценции прямозонного сильнолегированного некомпенсированного полупроводника? Компенсированного полупроводника?
6. Сопоставить работу полупроводникового фотокатода с положительным и эффективным отрицательным электронным средством (ОЭС). В чем состоят преимущества ОЭС-фотокатода?
7. Объяснить преимущества полупроводникового лазера на двойной гетероструктуре AlGaAs/GaAs/AlGaAs по сравнению с лазером на обычном p-n переходе.
8. Почему в полупроводниковом лазере на двойной гетероструктуре AlGaAs/GaAs/AlGaAs имеет место волноводный эффект в активном слое GaAs?
9. Объяснить эффект модуляции экситонного поглощения электрическим полем (эффект Штарка) (а) в объемном полупроводнике; (б) в квантовой яме.

Пример коллоквиума

1. Возможности и ограничения классической теории дисперсии Лоренца для описания оптических свойств различных сред: газов, жидкостей, металлов, диэлектриков.
2. Нарисовать схематично, в двойном логарифмическом масштабе спектр поглощения $\alpha(\hbar\omega)$ легированного прямозонного полупроводника в широком диапазоне коэффициентов поглощения α (от 1 до 10^6 см^{-1}) и энергий фотонов $\hbar\omega$ (от 10^{-3} до 10^3 эВ). Указать механизмы поглощения для каждой из областей спектра.

3. Обсудить сходство и различие оптических свойств кристаллических и аморфных полупроводников. Обсудить влияние ближнего и дальнего порядков в структуре полупроводника на электронные и оптические спектры.
4. Проанализировать возможности различных спектроскопических методов для определения параметров полупроводников и свойств полупроводниковых структур. Какие оптические эксперименты можно предложить, чтобы идентифицировать образец неизвестного полупроводника и определить его основные параметры?

Перечень задач для самостоятельного решения

1. В модели Лоренца найти действительную и мнимую части диэлектрической проницаемости сплошной среды, состоящей из осцилляторов с резонансной частотой ω_0 . Построить графики зависимостей показателя преломления $n(\omega)$ и показателя поглощения $k(\omega)$ в окрестности резонанса. Рассмотреть случай нескольких резонансов. Объяснить физический смысл ситуации с $n < 1$, когда фазовая скорость волны превышает скорость света.

2. Дана поляроидная пластинка. Определить экспериментально направление, соответствующее пропусканию линейно-поляризованного света. Калиброванного поляризатора под рукой нет.

3. Найти энергии электронов, рожденных светом с энергией фотонов $E = 1,57$ эВ в GaAs при межзонных переходах из зон тяжелых и легких дырок. Ширина запрещенной зоны GaAs $E_g = 1,52$ эВ, эффективная масса электронов $m_e = 0,067m_0$, тяжелых и легких дырок $m_{hh} = 0,55m_0$ и $m_{lh} = 0,086m_0$, соответственно.

4. Оценить ширину полосы поглощения, обусловленного переходом с основного состояния водородоподобного примесного центра в зону проводимости GaAs. Диэлектрическая проницаемость GaAs $\epsilon = 12,9$. Сопоставить ширину линий примесного поглощения и излучения.

5. Оценить величину ЭДС Дембера при освещении поверхности p -GaAs сильно поглощаемым светом с интенсивностью 10^{15} фотонов/см²·с. Концентрация и подвижность дырок равны $p = 10^{14}$ см⁻³ и $\mu_p = 400$ см²/В·с, соответственно. Диффузионная длина электронов $L = 10$ мкм.

6. Нарисовать (качественно) спектральные зависимости фототока в эпитаксиальной структуре p -Al_{0,2}Ga_{0,8}As/ p -GaAs/ n -GaAs при нулевой и конечной скорости рекомбинации фотоэлектронов на гетерогранице. Слои p -GaAs и p -Al_{0,2}Ga_{0,8}As толщиной $d = 10$ мкм и 3 мкм и с диффузионными длинами электронов $L = 5$ мкм и 2 мкм, соответственно, выращены на подложке n -GaAs. Структура освещается со стороны твердого раствора; фототок измеряется в режиме короткого замыкания между омическими контактами к слою p -Al_{0,2}Ga_{0,8}As и к подложке.

Примерные вопросы на экзамен

1. Указать пределы применимости феноменологического описания оптических свойств кристаллов.
2. В чем состоит явление Брюстера? Объяснить это явление на качественном уровне.
3. Нарисовать и объяснить на качественном уровне графики спектральных зависимостей коэффициента поглощения в объемном GaAs без учета и с учетом кулоновского взаимодействия электронов и дырок. Для обоих случаев нарисовать диаграммы, иллюстрирующие рождение светом электрон-дырочных пар.
4. Нарисовать и объяснить на качественном уровне графики спектральных зависимостей коэффициентов поглощения в объемном GaAs и в системе квантовых ям AlGaAs/GaAs/AlGaAs (без учета и с учетом экситонных эффектов).
5. В чем состоит эффект Фарадея? Объясните качественно микроскопическую природу этого эффекта для случая взаимодействия света со свободными носителями заряда.

6. Нарисовать (качественно) и объяснить графики спектральных зависимостей коэффициента поглощения в прямозонном полупроводнике в области собственного поглощения без магнитного поля и в квантующем магнитном поле (без учета кулоновского взаимодействия электронов и дырок). Как изменятся эти зависимости с учетом кулоновского взаимодействия?
7. В чем заключается метод эллипсометрии?
8. В чем заключаются методы фотолюминесценции и комбинационного рассеяния света? Сравните возможности этих методов для исследования свойств и определения параметров полупроводников и полупроводниковых структур?
9. Объяснить принципы работы фотодиода и светодиода на p-n переходах.
10. Объяснить преимущества полупроводникового лазера на двойной гетероструктуре AlGaAs/GaAs/AlGaAs по сравнению с лазером на обычном p-n переходе.
11. В чем заключаются методы рентгеновской и ультрафиолетовой фотоэмиссионной спектроскопии? Перечислить и пояснить возможности этих методов для исследования электронной структуры твердых тел?
12. На чем основана поверхностная чувствительность метода фотоэмиссионной спектроскопии?
13. Объяснить принцип работы и особенности полупроводниковых фотоэмиттеров с отрицательным электронным средством.

Пример билета на экзамен

1. Межзонные оптические переходы. Прямые и непрямые переходы. Влияние кулоновского взаимодействия электронов и дырок на поглощение света в полупроводниках (экситонные эффекты).
2. Фотолюминесценция. Идентификация типов оптических переходов и химической природы примесей. Измерение времени жизни.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы
по дисциплине «Оптические процессы в полупроводниках»
по направлению подготовки 03.04.02 Физика
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного