

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет
Кафедра физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники

УТВЕРЖДЕНО
решением Ученого совета ННГУ
протокол № 13 от 30.11.2022 г.

Рабочая программа дисциплины

Квантовая и оптическая электроника

Уровень высшего образования
Бакалавриат

Направление подготовки / специальность
03.03.02 - Физика

Направленность образовательной программы
Медицинская физика

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2023 год начала подготовки

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Квантовая и оптическая электроника» относится к обязательным дисциплинам формируемой участниками образовательных отношений части основной образовательной программы по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника».

Для усвоения данного курса необходимо изучить такие модули (дисциплины) в рамках образовательной программы бакалавра как «Физика», «Химия», «Кристаллография», «Физика полупроводников», «Квантовая механика» и иметь базовые представления о свойствах полупроводников, квантово-размерных эффектах, особенностях их реализации на известных материалах и структурах.

Цели освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины «Квантовая и оптическая электроника» является формирование знаний законов взаимодействия когерентного и некогерентного оптического излучения с квантовыми системами и использование их для создания приборов нано- и оптоэлектроники.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
ПК-3. Способен проводить научные исследования с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта	Демонстрация способности проводить научные исследования с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта	ПК-3 Знать фундаментальные основы физических явлений и процессов, лежащих в основе работы приборов и устройств квантовой оптоэлектроники и интегральной оптики. ПК-3 Уметь применять фундаментальные представления о физических явлениях и процессах, лежащих в основе работы приборов и устройств квантовой оптоэлектроники и интегральной оптики для достижения требуемых функциональных качеств приборов и устройств оптоэлектроники и интегральной оптики. ПК-4 Владеть опытом использования представлений о физических явлениях и процессах, лежащих в основе работы приборов и устройств квантовой оптоэлектроники и интегральной оптики для достижения требуемых	Вопросы по темам/разделам дисциплины. Комплект задач и заданий лабораторному практикуму. Фонд тестовых заданий

		функциональных характеристик	
--	--	------------------------------	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	4
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа	32
- контроль самостоятельной работы	2
самостоятельная работа	42
Промежуточная аттестация	36 экзамен
8 семестр – экзамен	

3.2. Структура дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Введение.	8	2	-	2	4	4
2. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомами и молекулами.	16	4	-	4	8	8
3. Усиление и генерация электромагнитного излучения.	16	4	-	4	8	8
4. Свойства, распространение и преобразование лазерных пучков.	16	4	-	4	8	8
5. Газовые, твердотельные и жидкостные лазеры, светоизлучающие диоды и полупроводниковые лазеры, мазеры.	16	4	-	4	8	8
6. Фотоприемники.	8	2	-	2	4	4
7. Оптические методы передачи и обработки информации.	16	4	-	4	8	8
8. Заключение.	12	2	-	2	6	6
Промежуточная аттестация - экзамен, 2 часа						

Содержание дисциплины

1. **Введение.** Предмет дисциплины и ее задачи. Особенности оптической электроники. Стандартная терминология, основные понятия и определения. Краткий исторический очерк. Классификация приборов наноэлектроники, квантовой и оптической электроники. Их роль в современной науке и технике.

2. **Взаимодействие электромагнитного излучения с атомами и молекулами.** Способы описания электромагнитного излучения. Энергетические состояния атомов и молекул. Квантовые числа. Квантовые переходы. Вероятность перехода. Спонтанное и вынужденное излучение. Коэффициенты Эйнштейна. Уширение спектральных линий. Однородное и неоднородное уширению Оптические характеристики вещества. Соотношения Крамерса-Кронига.

3. **Усиление и генерация электромагнитного излучения.** Принцип работы лазеров и мазеров. Инверсия населенности. Возбуждение активного вещества – накачка. Методы накачки. Кинетические уравнения. Двух-, трех- и четырехуровневые схемы работы. Оптические

резонаторы. Потери и добротность. Собственные типы колебаний – моды. Типы резонаторов. Конфокальные резонаторы. Селекция типов колебаний. Условие самовозбуждения лазеров. Пороговые энергии накачки по инверсии и по генерации. Насыщение усиления. Одномодовая и многомодовая генерация. Нестационарная генерация. Модуляция добротности. Синхронизация мод и сверхкороткие лазерные импульсы.

4. Свойства, распространение и преобразование лазерных пучков. Монохроматичность. Поляризация. Когерентность. Направленность лазерного излучения. Яркость. Гауссовы пучки. Пространственное, амплитудное и фазовое преобразования лазерных пучков. Нелинейные оптические явления. Генерация гармоник и частотные преобразования лазерного излучения. Параметрические преобразования.

5. Газовые, твердотельные и жидкостные лазеры, светоизлучающие диоды и полупроводниковые лазеры, мазеры. Общая характеристика и особенности газовых, твердотельных и жидкостных лазеров. Газоразрядные лазеры. Активные материалы для твердотельных лазеров. Матрицы и активаторы. Перестройка частоты твердотельных и жидкостных лазеров. Правила отбора и законы сохранения при оптических переходах в полупроводниковых соединениях A³B⁵, A²B⁶ и A⁴B⁶. Квазиуровни Ферми. Квантовый выход и эффективность излучательной рекомбинации. Электролюминесценция. Общая характеристика и особенности полупроводниковых лазеров и светодиодов. Эффект односторонней и сверхинжекции. Эффект широкозонного окна. Волноводный эффект. Условие инверсии в полупроводниках. Лазеры на двойных гетероструктурах и гетероструктурах с распределенной обратной связью. Лазеры с использованием квантоворазмерных эффектов. Особенности квантовых приборов радиодиапазона. Мазеры.

6. Фотоприемники. Классификация и технические характеристики приемников оптического излучения. Полупроводниковые фотоприемники. P-i-n фотодиоды и лавинные фотодиоды. Фотодиоды на основе барьера Шоттки.

7. Оптические методы передачи и обработки информации. Характеристика и особенности оптической связи. Структурные элементы оптоэлектроники. Оптроны. Передача оптических сигналов по световодам. Волоконно-оптические линии связи. Элементы интегральной оптики и нанооптики. Принципы голографии. Оптические методы обработки информации.

8. Заключение. Основные тенденции и направления развития квантовой электроники и оптоэлектроники.

4. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине «Квантовая и оптическая электроника» проходят в лекционной форме и в форме лабораторных занятий, а также в форме самостоятельной работы студентов. Самостоятельная работа студентов включает активное изучение лекционного материала вместе с соответствующими разделами учебных пособий.

При изучении дисциплины «Квантовая и оптическая электроника» применяются следующие образовательные технологии:

- Использование онлайн-ресурсов сети Интернет для поиска дополнительной к лекционному материалу информации на заданные темы, отвечающие основным разделам курса, как для углубленного изучения теоретического материала.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа включает в себя теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы, подготовку к лабораторным работам, обработку полученных на лабораторных занятиях результатов, оформление отчетов.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине «Квантовая и оптическая электроника»

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования.

ПК-4. Готовность проводить исследования и разработки в области нанофизики, наноматериалов, нанодиагностики, нанотехнологий и микросистемной техники с использованием современных методов анализа и контроля свойств наноструктурированных материалов и систем

Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения по семибалльной шкале						
	Плохо	Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Очень хорошо	Отлично	Превосходно
У1 (ПК-2) Уметь использовать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных.	Отсутствие умений	Фрагментарное присутствие умений без положительного результата решения типовой задачи в рамках дисциплины	Успешная демонстрация умений лишь для некоторых базовых задач в рамках дисциплины	Успешная демонстрация умений для всех базовых задач в рамках дисциплины	Успешная демонстрация умений для всех базовых и некоторых дополнительных задач в рамках дисциплины	Успешная демонстрация умений для всех базовых и дополнительных задач в рамках дисциплины	Успешная демонстрация умений для всех базовых и дополнительных задач, в том числе повышенной трудности
З1 (ПК-2) Знать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных.	Отсутствие знаний	Фрагментарные знания без положитель-	Успешная демонстрация знаний лишь для	Успешная демонстрация знаний	Успешная демонстрация знаний для всех	Успешная демонстрация знаний для всех	Успешная демонстрация знаний для

		ного результата решения типовой задачи в рамках дисциплины	некоторых базовых задач в рамках дисциплины	для всех базовых задач в рамках дисциплины	базовых и некоторых дополнительных задач в рамках дисциплины	базовых и дополнительных тем дисциплины	всех базовых и дополнительных тем дисциплины, в том числе повышенной трудности
В1 (ПК-2) Владеть опытом использования основных приемов обработки и представления экспериментальных данных.	Отсутствие навыков	Фрагментарные навыки без положительного результата решения типовой задачи в рамках дисциплины	Успешная демонстрация навыков решения задач лишь для некоторых базовых задач в рамках дисциплины	Успешная демонстрация навыков решения задач для всех базовых задач в рамках дисциплины	Успешная демонстрация навыков решения задач для всех базовых и некоторых дополнительных задач в рамках дисциплины	Успешная демонстрация навыков решения задач всех базовых и дополнительных задач в рамках дисциплины	Успешная демонстрация навыков решения задач всех базовых и дополнительных задач в рамках дисциплины, в том числе повышенной трудности

6.2. Описание шкал оценивания для дисциплины.

Промежуточной аттестацией для дисциплины «Квантовая и оптическая электроника» является устный экзамен, по итогам которого выставляется оценка по семибалльной шкале: оценки «Плохо» и «Неудовлетворительно» означают отсутствие аттестации, оценки «Удовлетворительно», «Хорошо», «Очень хорошо», «Отлично» и «Превосходно» выставляются при успешном прохождении аттестации.

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций

Промежуточной аттестацией для дисциплины «Квантовая и оптическая электроника» является устный экзамен, на котором обучаемые представляют развернутый ответ на два теоретических вопроса, содержащийся в списке «Контрольные вопросы», приведённом ниже в разделе 6.4.1. настоящей программы. Критериями для выставления оценки являются следующие индикаторы:

- Знание обучающимися основных теоретических положений дисциплины, умение представить их грамотное изложение в виде основных формул, теорем и поясняющих чертежей;

- Умение обучающихся представить вывод тех или иных теоретических положений, теорем и результатов курса;
- Навыки обучающихся в решении практических задач той или иной степени сложности.

В зависимости от успешности выполнения данных критериев на промежуточной аттестации (устном экзамене) выставляется одна из следующих оценок:

«Плохо» - обучающийся не продемонстрировал никаких знаний об основных теоретических разделах курса.

«Неудовлетворительно» - обучающийся не продемонстрировал представления об основных теоретических разделах.

«Удовлетворительно» - обучающийся продемонстрировал изложение только формулировок основных теоретических положений курса без их обоснования и с использованием наводящих вопросов от экзаменатора.

«Хорошо» - обучающийся продемонстрировал связное изложение основных теоретических положений курса и их обоснование, и незначительными наводящими вопросами экзаменатора.

«Очень хорошо» - обучающийся продемонстрировал самостоятельно изложение всех теоретических положений курса и их обоснование, но не смог ответить на дополнительный вопрос или решить дополнительную задачу повышенной трудности.

«Отлично» - обучающийся продемонстрировал высокий уровень в самостоятельном изложении всех теоретических положений курса и их обосновании, и смог ответить на дополнительный вопрос или решить дополнительную задачу повышенной трудности.

«Превосходно» - обучающийся продемонстрировал выдающийся уровень знаний в самостоятельном изложении всех теоретических положений курса и их обосновании, и смог ответить на дополнительный вопрос или решить дополнительную задачу повышенной трудности.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

6.4.1. При проведении промежуточной аттестации (экзамена) обучающимся предлагаются следующие контрольные вопросы, охватывающие программу дисциплины «Квантовая и оптическая электроника»:

1. Когерентность. Корреляционная функция. Степень когерентности светового пучка.
2. Методы измерения пространственной и временной когерентности.
3. Спекл. Спекл-фотография, спекл-интерферометрия.
4. Принцип квантового усиления электромагнитных волн. Инверсия населенностей, отрицательная температура.
5. Спонтанное и индуцированное излучение. Коэффициенты Эйнштейна.
6. Равновесные и неравновесные системы микрочастиц. Процессы релаксации.

7. Методы описания динамики процессов в квантовых усилителях и генераторах. Вероятностный метод. Необходимые условия самовозбуждения квантового генератора.
8. Особенности оптического диапазона. Открытые оптические резонаторы. Классификация оптических резонаторов.
9. Основные особенности твердотельных лазеров. Трехуровневая и четырехуровневая схемы реализации состояния инверсии населенностей.
10. Зонная диаграмма барьера Шоттки. Механизм разделения неравновесных носителей заряда, возникающий при его освещении.
11. Спектральные зависимости коэффициента поглощения в случае собственного поглощения прямозонными и непрямозонными полупроводниками.
12. Описать принцип действия волоконных световодов.
13. Основные типы волоконных световодов: одномодовый световод; многомодовый градиентный световод; многомодовый световод со ступенчатым профилем показателя преломления.
14. Оптоэлектронные гибридные вычислительные системы.
15. Фазовое преобразование тонких линз.
16. Критическая частота и длина волны волоконного световода. Понятие числовой апертуры.
17. Фазово-контрастный микроскоп Цернике.
18. Когерентная система оптической обработки информации. Когерентный оптический спектральный анализ.
19. Синтез в области пространственных частот. Эксперимент Аббе-Портера.
20. Основные некогерентные системы оптической обработки информации.
21. Синтез в пространственной области.
22. Условие полного внутреннего отражения. Распределение поля при полном внутреннем отражении.
23. Фазовый сдвиг и сдвиг Гооса-Генхена при полном внутреннем отражении.
24. Фурье-преобразующие свойства линз
25. Новые возможности оптической системы при использовании обратной связи.
26. Когерентная оптическая комплексная пространственная фильтрация.
27. Физические принципы голографии. Основные типы голограмм.
28. Голограммы Габора, Лейта–Упатниекса, Денисюка.
29. Свойства двух восстановленных изображений.
30. Амплитудные и фазовые голограммы.
31. Голограммы Фраунгофера, Френеля и Фурье.
32. Максимальная эффективность плоских голограмм.

6.4.2. Образец экзаменационного билета:

Билет № XXX	
1)	Физические принципы голографии. Интерференция. Дифракция.
2)	Физические основы квантовой электроники.

6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.

Для проведения процедуры оценивания используется балльная система оценок. Успешная работа студента на лабораторных занятиях один балл. Также один балл прибавляется при самостоятельно проявляемом желании студента решить ту или иную задачу на лабораторном занятии. При демонстрации неудовлетворительной работы на лабораторном занятии для соответствующего обучающегося один балл снимается. По итогам работы в

семестре набранные обучающимися баллы участвуют в формировании оценки на промежуточной аттестации на экзамене, шкала оценок для которой описана выше в разделе 6.3. настоящей программы.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Квантовая и оптическая электроника»

а) основная литература:

- 1) Бутиков Е. И. Оптика: Учебное пособие. 3-е изд., доп. СПб.: Лань, 2012. 608 с.
http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=2764
- 2) Игнатов А. Н. Оптоэлектроника и нанофотоника: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2011. 528 с. https://e.lanbook.com/book/95150#book_name
- 3) Комоцкий В. А. Основы когерентной оптики и голографии: Конспект лекций. М.: РУДН, 2011. 164 с. <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785209036272.html>
- 4) Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 488 с.
<http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922109956.html>
- 5) Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2013. 288 с.
http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=5851
- 6) Семенов А. Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС. М.: Академия АйТи; ДМК Пресс, 2007. 632 с.
<http://www.studentlibrary.ru/books/ISBN5984530252.html>
- 7) Стафеев С. К., Боярский К. К., Башнина Г. Л. Основы оптики: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Лань, 2013. 336 с.
http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=32822
- 8) Черненко В. Д. Оптомеханика волоконных световодов: Учебное пособие. СПб.: Политехника, 2011. 291 с. <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785732509854.html>

б) дополнительная литература:

- 1) Калитеевский Н.И. Волновая оптика – М.: Высшая школа, 1978, 383с.
- 2) Ярив А. Введение в оптическую электронику М.: "Высшая школа, 1983 .
- 3) Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроники – М.: "Высшая школа", 2001, 573с.
- 4) Пихтин А.Н. Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники. – М., "Высшая школа", 1983, 304с.
- 5) Звелто О. Принципы лазеров – М.: Мир, 1984, 400с.
- 6) Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей / Ю. Н. Кульчин, О. Б. Витрик, А. А. Камшилин, Р. В. Ромашко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 288 с. <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922111942.html>
- 7) Волоконные технологические лазеры: Учебное пособие / Ю. В. Голубенко, А. В. Богданов, Ю. В. Иванов, Р. С. Третьяков. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 50 с. http://www.studentlibrary.ru/book/bauman_0153.html
- 8) Григорьянц А. Г., Васильцов В. В. Пространственная структура излучения волноводных и волоконных технологических лазеров: Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 37 с.
<http://www.studentlibrary.ru/books/ISBN9785703838341.html>
- 9) Калитеевский Н. И. Волновая оптика: Учебное пособие. 5-е изд., стер. СПб: Лань, 2008. 480 с. http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=173

- 10) Колобов М. И. Квантовое изображение / под ред. М. И. Колобова; пер. с англ. Т. Ю. Голубевой под ред. А. С. Чиркина. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 328 с.
<http://www.studentlibrary.ru/books/ISBN9785922111911.html>
- 11) Паршаков А. Н. Введение в квантовую физику: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2010. 352 с. http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=297
- 12) Савельев И. В. Курс физики. В 3-х тт. Т.2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика: Учебное пособие. 4-е изд., стер. СПб.: Лань, 2008. 480 с.
http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=347
- 13) Сигов А. С., Нефедов В. И., Шука А. А. Электроника: Учебное пособие / под ред. А. С. Сигова. М.: Абрис, 2012. 348 с.
<http://www.studentlibrary.ru/books/ISBN9785437200728.html>

Доступ на электронные ресурсы с компьютеров ННГУ.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

Для выполнения лабораторных работ:

1. Изучение отражения, преломления и взаимодействия электромагнитного поля на плоской границе раздела сред.

2. Определение профиля показателя преломления заготовок и изготовленных из них оптических волокон.

3. Внутренний фотоэффект в полупроводниках.

4. Изучение принципов работы твердотельного лазера на рубине.
используется современное оборудование:

- голографическая установка с твердотельным лазером.
- установка для исследования параметров оптического волокна на базе монохроматора МДР-204.
- установка для исследования оптических свойств массивных материалов на базе лазера ЛГН-223-1 и системы поворотных столиков Standa.
- установка для исследования электрооптических характеристик полупроводников на базе монохроматора МДР-204.

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

Программа составлена в соответствии с требованиями установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.03.02 - Физика

Автор:
профессор

А. И. Машин

Рецензент:
заведующий кафедрой
теоретической физики, д.ф.-м.н. В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой
физики полупроводников,
электроники и нанoeлектроники
д.ф.-м.н. профессор Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета
ННГУ, протокол б/н от «14» декабря 2021 г.

Председатель Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ А.А. Перов