

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**федеральное государственное автономное**  
**образовательное учреждение высшего образования**  
**«Национальный исследовательский**  
**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

**УТВЕРЖДЕНО**  
решением  
президиума ученого совета ННГУ  
протокол от " 16 " января 2024 г. № 1

**Рабочая программа дисциплины**  
**Физические основы оптоэлектроники**

Уровень высшего образования  
**Подготовка научных и научно-педагогических кадров**

Программа аспирантуры  
**Радиофизика**

Научная специальность  
**1.3.4 Радиофизика**

Форма обучения  
**Очная**

Нижний Новгород  
2024 год начала подготовки

### **1. Место и цель дисциплины в структуре ПА**

Дисциплина «Физические основы оптоэлектроники» относится к числу *элективных* дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 2-ом году обучения в 4 семестре.

**Цель дисциплины** – изучение аспирантами наиболее важных физических моделей, лежащих в основе современных оптоэлектронных систем и их элементной базы. Основой для такого рассмотрения является материал курсов «Квантовая радиофизика» и «Методы оптических измерений».

### **2. Планируемые результаты обучения по дисциплине**

Выпускник, освоивший программу, должен

#### **Знать:**

- физические механизмы взаимодействия электромагнитного поля с веществом и их конкретном проявлении при преобразовании, усилении и генерации когерентного электромагнитного излучения в квантовых генераторах оптического диапазонов длин волн и других устройствах современной оптоэлектроники;
- основные современные квантовые схемы генерации когерентного излучения; модовые структуры открытых оптических резонаторов и световодов различной конфигурации;
- основные новейшие технологии, определяющие принципы работы базовых типов лазерных излучателей (твердотельные, полупроводниковые, газовые лазеры) и других оптоэлектронных элементов;

#### **Уметь:**

- формулировать и анализировать пути и возможности улучшения рабочих характеристик лазерных излучателей, - методы управления оптическими пучками;
- анализировать проблемы сопряжения оптических элементов в оптоэлектронных схемах, ориентироваться в функциональном назначении и особенностях работы оптоэлектронных приборов;
- выполнять расчёты, связанные с количественной оценкой эффектов, возникающих при распространении электромагнитного излучения в планарных волноводах и оптических волокнах;

#### **Владеть:**

- методами анализа и оценки эффективности оптоэлектронных систем при постановке научных экспериментов и решении других прикладных задач.

### **3. Структура и содержание дисциплины**

Объем дисциплины (модуля) составляет 3 з.е., всего - 108 часов, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа), 72 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

**Таблица 1****Структура дисциплины**

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					
		Контактная работа, часов					Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
1. Введение. Оптические системы. Связь оптоэлектроники и квантовой электроники	6	2				2	4
2. Усиление в активных средах. Физические принципы генерации лазерного излучения	12	4				4	8
3. Спектральные, мощностные и шумовые характеристики современных лазерных излучателей. Методы измерения параметров лазерного излучения	12	4				4	8
4. Аналитические оптические системы на основе лазеров.	12	4				4	8
5. Детектирование оптических сигналов. Фотоприемники и их предельная чувствительность	6	2				2	4
6. Методы управления лазерным излучением. Элементная база систем оптической модуляции лазерного излучения	6	2				2	4
7. Полупроводниковый лазер как элемент оптоэлектронных систем	12	4				4	8
8. Распространение ЭМ волн в волоконном световоде (геометрическая и волновая оптика)	12	4				4	8
9. Современные ВОЛС с частотным уплотнением каналов	12	4				4	8
10. Оптические и волоконно-оптические сенсоры и датчики	18	6				6	12
Промежуточная аттестация: – зачет							
<b>Итого</b>	<b>108</b>	<b>36</b>				<b>36</b>	<b>72</b>

**Таблица 2****Содержание дисциплины**

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля*
1.	Введение. Оптические системы. Связь оптоэлектроники и	Специфические особенности систем оптического диапазона. Источники излучения, фотоприемники и линии передач в оптических системах.	Лекции	-

	квантовой электроники			
2.	Усиление в активных средах. Физические принципы генерации лазерного излучения	Двухуровневая идеализация при рассмотрении активных сред. Взаимодействие двухуровневой среды с электромагнитным резонансным полем. Материальные уравнения для поляризации и разности населенностей активной среды. Насыщение перехода в сильных полях. Активная среда с инверсией как основа квантового генератора. Методы создания инверсии в современных лазерных излучателях. Открытые оптические резонаторы. Добротность резонатора, время жизни фотона в резонаторе. Условие самовозбуждения лазерного излучателя.	Лекции	-
3.	Спектральные, мощностные и шумовые характеристики современных лазерных излучателей. Методы измерения параметров лазерного излучения	Основные характеристики лазерных кристаллов. Редкоземельные элементы, элементы группы железа. Спектральные характеристики кристаллов, допированных ионами Nd, Yb, Tm, Ho, Cr, Ti. Полупроводниковые лазеры. Принцип работы и основные характеристики. Методы управления спектральными характеристиками. Шумовые свойства полупроводникового лазера. Стабильность и надежность лазерных диодов Временные и пространственные спектры излучения. Классификация спектров. Основные различия временных и пространственных частот. Изменение амплитуды, фазы и частоты гармоник при прохождении электромагнитного излучения через линейные системы. Связь между пространственными и временными частотами.	Лекции	-
4	Аналитические оптические системы на основе лазеров.	Лазерная спектроскопия высокого разрешения. Основные принципы. Спектроскопия насыщения. Двухфотонная спектроскопия Применение полупроводниковых лазеров в измерительных системах. Лазерный гирокоп. Физические принципы измерения угловых величин. Лазерный доплеровский измеритель скорости объекта. Лазерная спектроскопия. Абсорбционная спектроскопия ближнего ИК-диапазона. Лазерная интерферометрия. Прецизионные	Лекции	-

		измерения физических величин с помощью интерферометров на основе ПЛ.		
5.	Детектирование оптических сигналов. Фотоприемники и их предельная чувствительность	Фотодиоды и их свойства. Квантовый выход идеального фотоприемника. Предельная чувствительность фотодиода. Быстродействующие фотоприемники (р-и-п фотодиоды, лавинные фотодиоды). Конструкция. Характеристики. Другие электронные устройства, применяемые в оптических системах связи и измерительных системах	Лекции	-
6.	Методы управления лазерным излучением. Элементная база систем оптической модуляции лазерного излучения	Модуляция лазерного излучения. Электрооптическая и магнитооптическая модуляция. Взаимодействие света с акустическими волнами; дифракция Брэгга и Рамана-Ната. Нестационарные режимы генерации. Методы повышения мощности генерации лазеров. Метод модулированной добротности. Метод синхронизации мод в лазерах. Генерация гигантских импульсов. Электрооптические и акустооптические модуляторы и дефлекторы. Оптические изоляторы	Лекции	-
7.	Полупроводниковый лазер как элемент оптоэлектронных систем	Принцип работы полупроводникового лазера (ПЛ). Оптические гетероструктуры. Процессы излучательной рекомбинации. Инверсия и усиление в полупроводниковой активной среде. Физические параметры и рабочие характеристики ПЛ. Спектрально-энергетические свойства излучателей Модуляционные свойства полупроводникового лазера. Типы современных ПЛ, применяемых в системах связи	Лекции	-
8.	Распространение ЭМ волн в волоконном световоде (геометрическая и волновая оптика)	Распространение оптических волн в волоконном световоде (геометрическое приближение, волновое приближение). Волновое уравнение для цилиндрического волновода. Основные типы световодов, их геометрические и технологические особенности. Волоконные преобразователи излучения. Дисперсионное уравнение и дисперсионные характеристики ВС. Физические причины затухания в волокнах. Общая физическая модель согласования волноводных структур. Способы согласования ПЛ и одномодовых волоконных световодов.	Лекции	-

9.	Современные ВОЛС с частотным уплотнением каналов	Элементная база и конфигурация волоконных каналов связи. Источники избыточного шума в волоконных каналах передачи информации. Пропускная способность оптического канала связи при амплитудной аналоговой модуляции излучателя. Когерентная оптическая связь. Цифровые волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). Аналоговые ВОЛС. Преимущества и недостатки. Современное состояние и перспективы систем ВОЛС	Лекции	-
10.	Оптические и волоконно-оптические сенсоры и датчики	Общее понятие о волоконно-оптических (ВО) датчиках. ВО датчики с амплитудным преобразованием (температурные датчики, датчики смещения, рефрактометрические преобразователи). Принципы построения поляризационных и фазовых ВО датчиков. Измерительные фазовые системы на основе волоконных интерферометров (ВОИ). Формирование выходного сигнала в ВОИ. Методы снижения избыточных шумов и устранения дрейфа рабочей точки в волоконных схемах. Эффект Саньяка и его использование в ВО датчиках. ВО гироскоп и его предельная чувствительность. Проблемы детектирования сигнала в ВО гироскопе .	Лекции	-

#### **4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся**

1. Еженедельный контроль посещаемости аудиторных занятий.
2. Собеседование с обучающимися во время аудиторных занятий.
3. Как оценочный способ контроля самостоятельной работы студентов и одновременно разновидность интерактивного обучения используется форма групповой консультации по отдельным разделам дисциплины в виде семинаров по современным проблемам оптоэлектроники и квантовой электроники, проводимым на кафедре факультативно.

#### **5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине**

##### ***5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине***

При выполнении всех работ учитываются следующие **основные критерии**:

- уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы);
- умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;

- качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая сжатости);
- способность устанавливать внутри- и межпредметные связи,
- оригинальность мышления, знакомство с дополнительной литературой и другие факторы.

**Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме зачета**

<b>Оценка</b>	<b>Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой</b>
<i>Зачтено</i>	владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить проблемные ситуации в организации научных исследований, способность критически анализировать и сравнивать существующие подходы и методы к оценке результативности научной деятельности, свободное владение источниками, умение четко и ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.
<i>Не зачтено</i>	непонимание смысла ключевых проблем, недостаточное владение науковедческой терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации, неспособность анализировать и сравнивать существующие концепции, подходы и методы, неумение ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.

**5.2. Примеры типовых контрольных вопросов или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине**

1. Инверсия - необходимое условие усиления. Показатель усиления. Сечение перехода. Квантовый выход.
2. Двух-, трёх- и четырёхуровневая схемы лазеров: возможности реализации, достоинства и недостатки. Оптимальная ширина уровней.
3. Зависимость начального коэффициента усиления от скорости накачки. Роль метастабильности верхнего уровня лазерного перехода в создании начального усиления. Влияние насыщения на величину усиления.
4. Стационарный режим генерации. Условие порога генерации.
5. Продольные моды резонатора. Резонансные частоты. Добротность резонатора. Формирование спектра выходного излучения лазера.
6. Поперечные моды резонатора. Одномодовый режим генерации.
7. Однородное и неоднородное уширение линии рабочего перехода.
8. Механизмы однородного уширения. Вывести выражение для однородно уширенного контура линии. Дать оценку её ширины (в см<sup>-1</sup>) для одного из радиационных переходов He.
9. Влияние матрицы лазерной среды на спектр усиления.
10. Пространственное существование мод. Межмодовая конкуренция. Эффект затягивания частот.
11. Причины нестационарного режима генерации. Режим свободной генерации. Скоростные уравнения Статца-Де Марса.
12. Режим генерации гигантских импульсов. Активная модуляция добротности резонатора. Пассивная модуляция добротности резонатора.
13. Режим синхронизации продольных мод резонатора.
14. Основные характеристики лазерных кристаллов.
15. Ион-фононное взаимодействие. Безызлучательная релаксация.
16. Межионное взаимодействие. Ап-конверсия. Кросс-релаксация.

17. Редкоземельные элементы. Элементы группы железа. Спектральные характеристики кристаллов, допированных ионами Nd, Yb, Tm, Ho, Cr, Ti.
18. Ламповая накачка. Спектральные характеристики. Методы ввода излучения накачки.
19. Методы управления спектральными характеристиками полупроводниковых лазеров.
20. Наводимые накачкой линзы в активных средах, влияние линз на параметры резонатора.
21. Влияние согласования мод резонатора с областью накачки на параметры генерации для трех- и четырехуровневых активных сред
22. Nd:АИГ лазер: квантовая схема, преимущество матрицы, организация эффективной накачки.
23. Показать, что абсолютная ширина линии открытого оптического резонатора с плоскими зеркалами не зависит от частоты. Оценить (в  $\text{см}^{-1}$ ) интервал между продольными модами и ширину линии такого резонатора для  $R=0,99$  и  $L=1$  м.
24. Оценить число продольных мод, генерируемых He-Ne лазером длиной  $\sim 1$  м, считая, что температура разряда не слишком отличается от комнатной. Зависит ли ширина провала в насыщенном контуре усиления и ширина линии излучения лазера от длины резонатора?
25. Найти значение ненасыщенного коэффициента усиления для полупроводникового лазера с длиной активной области 100 мкм при использовании сколов по кристаллическим поверхностям в качестве зеркал.
26. Обосновать необходимость многокомпонентных материалов для приготовления диодных структур. Преимущества и недостатки соединения AlGaAs как материала для лазерных диодов. Привести пример материалов для диодной структуры на «телекоммуникационный» диапазон  $\sim 1,3$  мкм.
27. Особенности гетероструктуры на основе InGaAsP/InP. Вид ватт-амперной характеристики, спектр лазера и светодиода на её основе.
28. Чем определяется ширина полосы лазерного диода как источника информации? Почему светодиоды уступают им по этому параметру? Указать оценки для обоих случаев.
29. Как и почему зависит от температуры рабочая частота лазерного диода? Почему с ростом температуры снижается эффективность генерации?
30. Указать и обосновать преимущества лазерных диодов с распределённой обратной связью и распределённым брэгговским отражением по сравнению с диодами простейшей геометрии.
31. Сравнить эффективность управления сигналами от лазерного диода путём модуляции накачки, модуляции добротности и модуляции выходного пучка.
32. Оценить ширину линии излучения и интервал между продольными модами для типичного лазерного диода
33. Что такое нормированная частота, и какие свойства волоконных световодов она определяет?
34. Известны ли вам оптические системы, где наличие когерентного лазерного излучения является нежелательным фактором?
35. Проанализируйте преимущества и недостатки возможных источников оптического излучения при использовании их в волоконно-оптических линиях связи.
36. Оптическое волокно представляет собой однослойный кварцевый световод с показателем преломления 1,50 ( без внешней оболочки). Исходя из основных параметров этого световода, дайте его характеристику в сравнении с обычными многомодовыми двухслойными волокнами.
37. Проанализируйте причины избыточных оптических шумов в волоконно-оптических каналах связи.
38. Оцените эффективность ввода излучения от поверхностно излучающего светодиода в волокно с показателями преломления сердцевины ( $d=50\text{мкм}$ ) и оболочки ( $D=125\text{мкм}$ )



соответственно 1,470 и 1,455. Является ли данное волокно многомодовым? Можно ли оценить его дисперсионные характеристики?

39. Каким элементом (источником излучения или волоконным световодом) обусловлено дисперсионное размывание сигнала в протяженных линиях связи? Каковы возможные пути уменьшения этого эффекта?
40. В чем преимущество волоконных световодов с градиентным профилем показателя преломления над ступенчатыми?
41. Чем определяется широкополосность волоконно-оптического канала связи с полупроводниковым лазером в качестве источника света, использующего фазовый метод передачи информации?

## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

а) основная литература:

1. Э. Розеншер, Б. Винтер «Оптоэлектроника». М.: «Техносфера», 2006.
2. В.И. Дудкин, Л.Н. Пахомов «Квантовая электроника. Приборы и их применения» Техносфера, 2006. – 432с.
3. Янг М. «Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические волноводы», М.: «Мир». 2005г. – 541с.

б) дополнительная литература:

1. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике - М.: «Наука», 1988, 324с.
2. О.Н. Ермаков «Прикладная оптоэлектроника» «Техносфера», 2004г.
3. Салех Б., Тейх М. «Оптика и фотоника». Т.1 Долгопрудный, «Интеллект», 2012г. – 760с.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Электронно-библиотечные системы (электронная библиотека):

<http://e.lanbook.com/>; <http://www.biblioclub.ru>.

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети Интернет и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ;
- материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование;
- лицензионное программное обеспечение: *Windows, Microsoft Office*;
- обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122), Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-

педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Авторы: к.ф.-м.н., доцент А.В. Маругин, к.ф.-м.н., доцент А.П.Савикин

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. А.В. Кудрин

Заведующий кафедрой: д.ф.-м.н., снс С.А. Бельков

**Программа одобрена** на заседании Методической комиссии радиофизического факультета от «18» декабря 2023 года, протокол № 09/23.