

**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 Квантовой оптики**



ПРИТВЕРЖДАЮ
Декан ФФ, д.ф.-м.н.
В.Е.Блинов
2022 г.

**Рабочая программа дисциплины
ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА 2**

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

Форма обучения
Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Итоговая аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к итоговой 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	32			18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётных 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:	3
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.	4
5. Перечень учебной литературы.	7
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	8
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 итоговой аттестации по дисциплине.	9

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

Цель курса – овладение основными понятиями, моделями, теоретическими и экспериментальными методами волоконной оптики.

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 теоретические основы волоконной оптики, технику волоконно-оптического эксперимента и основы базовых технологий, основные физические процессы, связанные с распространением света в волоконных световодах, как линейные, так и нелинейные.</p> <p>Уметь объяснить принципы работы основных волоконно-оптических устройств и волоконно-оптических систем, в т.ч. систем связи и сенсорных систем на основе точечных (ВБР) и распределенных волоконных датчиков.</p> <p>Владеть выводом и решением нелинейного уравнения Шредингера, понятием солитона, описанием нелинейных эффектов при распространении коротких импульсов света в волоконных световодах и при преобразовании света (ВКР, ВРМБ).</p>

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы:

Дисциплина «**Волоконная оптика 2**» реализуется в весеннем семестре 1-го курса для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки **03.04.02 Физика**. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой квантовой оптики. Для его восприятия требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим дисциплинам как основы квантовой механики и статистической физики, физическая оптика, а также по математике (основы математического анализа и линейной алгебры).

Курс предназначен для магистрантов, область будущей профессиональной деятельности которых включает:

- научные исследования, метрологию и инженерную деятельность с использованием методов волоконной оптики;
- исследования процессов взаимодействия оптического излучения с веществом;
- научные и технологические разработки в области волоконных лазерных систем.

3. Трудоемкость 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 итоговой 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	32			18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётных 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, консультации, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: контрольные работы, задания для самостоятельного решения;
- итоговая аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 32 часа;
 - самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов;
 - итоговая аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 22 часа;
- Объем контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, групповые консультации, экзамен) составляет 36 часов.

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

Дисциплина «Волоконная оптика 2» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 1-м курсе физического факультета НГУ во 2 семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 академических часа.

№ п/ п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Всего	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)			Промежуточная аттестация (в часах)
				Аудиторные часы		Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Волоконно-оптические датчики на основе ВБР	1	3	2		1	
2	Распределенные волоконно-оптические датчики	2	3	2		1	
3	Дисперсия и нелинейность, типы волокон	3	3	2		1	
4	Теория линейных эффектов в оптоволокне	4	3	2		1	
5	Теория нелинейных эффектов в оптоволокне	5	3	2		1	
6	Самомодуляция фазы	6	3	2		1	
7	ВРМБ	7	3	2		1	
8	ВКР	8	3	2		1	
9	Удвоение частоты волоконных лазеров	9-10	7	4		3	
10	Основные типы усилителей и их характеристики	11	3	2		1	
11	Волоконные усилители	12	3	2		1	
12	Основы волоконно-оптической связи	13-14	7	4		3	
13	Увеличение пропускной способности волоконно-оптических линий связи	15	4	2		2	
14	Заключение	16	2	2			
16	Консультация		2				2
17	Самостоятельная работа в период подготовки к итоговой аттестации		18				18
18	Экзамен		2				2
ВСЕГО			72	32		18	24

Программа и основное содержание лекций (32 часа)

Раздел 1. Волоконно-оптические датчики на основе ВБР (2 часа)

Краткая связь с первым семестром. Возможности практических применений волоконной оптики. Точечные датчики температуры и деформаций на основе ВБР. Численные коэффициенты, оценки чувствительности. Методы детектирования. Спектральное и временное мультиплексирование ВБР. Распределённые мультисенсорные системы. Применения ВБР-датчиков: скважины, шахты, генераторы, объекты инфраструктуры.

Раздел 2. Распределенные волоконно-оптические датчики (2 часа)

Волоконно-оптический рефлектометр. Фазочувствительный рефлектометр. Распределенные системы регистрации внешних воздействий. Распределенный датчик температуры на основе ВКР. Датчики на основе ИФП: принцип, формулы, оценки, методы детектирования, параметры. Другие ВО датчики. Применения волоконно-оптических датчиков: объекты инфраструктуры, скважины, охранные системы, биомедицина.

Раздел 3. Дисперсия и нелинейность, типы волокон (2 часа)

Дисперсия в волокне. Материальная дисперсия, уравнение Зелмейера. Волноводная дисперсия. Нормальная и аномальная дисперсии. Одномодовые и многомодовые волокна. Межмодовая дисперсия. Типы нелинейностей в световодах: ВРМБ и ВКР, керровская нелинейность (SPM, XPM, FWM). Специальные волокна: со сглаженной и сдвинутой дисперсией, с высокой и низкой нелинейностью.

Раздел 4. Теория линейных эффектов в оптоволокне (2 часа)

Линейное уравнение Шредингера.

Раздел 5. Теория нелинейных эффектов в оптоволокне (2 часа)

Важность нелинейных эффектов в оптоволокне. Теория нелинейных эффектов. Обобщённое нелинейное уравнение Шредингера. Классификация эффектов.

Раздел 6. Самомодуляция фазы (2 часа)

Фазовая кросс-модуляция. Модуляционная неустойчивость. Поляризационные эффекты.

Раздел 7. ВРМБ (2 часа)

Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ). История эффекта. Стоксов сдвиг. Линия усиления. Порог ВРМБ. Истощение накачки. Насыщение усиления. ВРМБ-зеркало. Стоксовы линии высоких порядков. Волоконный ВРМБ-лазер и волоконный ВРМБ-усилитель. Нежелательные проявления.

Раздел 8. ВКР (2 часа)

Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР). История ВКР. Описание процесса. Стоксов сдвиг и линия усиления. Порог ВКР. Волоконный ВКР-лазер. Устройство. Принцип работы. Достижимые параметры. Истощение накачки и последовательное насыщение мощности стоксовых волн. Моды ВКР-лазера. Сверхдлинный волоконных ВКР-лазер. Формирование спектра генерации за счет волновой турбулентности.

Раздел 9. Удвоение частоты волоконных лазеров (4 часа)

Волоконные лазеры видимого диапазона на основе ап-конверсии. Удвоение частоты волоконных лазеров. Периодически ориентированные кристаллы. Однопроходная схема. Внутррезонаторное удвоение. Удвоение большого количества мод со случайной фазой. Генерация второй гармоники в волокне.

Раздел 10. Основные типы усилителей и их характеристики (2 часа)

Типы усилителей: полупроводниковые, волоконные (редкоземельные элементы, ВКР, ВРМБ, параметрические), твердотельные и т.д. Применения усилителей различных типов. Усилители в телекоммуникации: на выходе передатчика, промежуточные, перед приемником. Ограничения. Преимущества по сравнению с регенераторами. Характеристики усилителей: количественные и коэффициенты качества. Ширина полосы усиления: зависимость от коэффициента усиления. Мощность насыщения на примере 2-х уровневой системы (повторение). Преимущества по сравнению с полупроводниковыми усилителями. Оценка для запасенной энергии.

Раздел 11. Волоконные усилители (2 часа)

Телекоммуникационные диапазоны. Эрбиевые волокна для С и L-диапазонов: спектральные характеристики усиления и поглощения, различие параметров. Мощность накачки, длина, коэффициент усиления и рабочие длины волн: графики. Схемы двухдиапазонных усилителей. Отношение сигнал/шум. Спонтанное излучение: излучение в одну поперечную моду. Связь времени жизни и сечения вынужденного излучения. Минимальное увеличение шума: шумовой коэффициент. Почему для приемника плох фон. Другие редкоземельные элементы. Длины волн (напоминание). Усиление излучения волоконных непрерывных и импульсных лазеров. Влияние ВРМБ на параметры усилителей. Способы подавления ВРМБ. Волоконный ВКР-усилитель. Оценки мощности накачки для сосредоточенного и распределенного усилителя. Преимущества распределенных усилителей.

Раздел 12. Основы волоконно-оптической связи (4 часа)

Основные элементы волоконно-оптических линий связи. Источники излучения. Приемники излучения. Оптическое волокно. Волоконно-оптический кабель. История волоконной связи. Первые системы и их характеристики (многомодовые, одномодовые, подводные). Ограничения при увеличении пропускной способности (потери и дисперсия, нелинейные эффекты). Потери. Необходимость усилителей. Оптоэлектронные усилители. EDFA и их преимущества в связи. Напоминание об их параметрах (мощность насыщения, коэффициент усиления и шум-фактор). Протяженная ВОЛС с периодическим усилением. OSNR. Длина безрегенерационного участка, зависимость от скорости. Ограничение по дисперсии. Управление дисперсией.

Раздел 13. Увеличение пропускной способности волоконно-оптических линий связи (2 часа)

Пропускающая способность. Временное и спектральное уплотнение. Солитонные линии связи. БЕР. Глаз-диаграмма. Прямая коррекция ошибок. Спектральное мультиплексирование и плотное мультиплексирование. Компоненты мультиплексирования. Форматы данных. Понятие спектральной эффективности.

Раздел 14. Заключение (2 часа)

Прогноз развития волоконной оптики. Новое в оптической связи. Перспективные направления физики и техники волоконных лазеров и сенсоров. Новые применения волоконных лазеров и сенсоров (биомедицина и т.д.). Основные направления исследований и проекты по волоконной оптике в СО РАН.

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям	9
Подготовка к контрольным работам	9
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. Бейли, Дэвид. Волоконная оптика: теория и практика: [пер. с англ.] / Дэвид Бейли, Эдвин Райт. Москва : Кулиц-Пресс, 2008, 320 с. : ил. ; 21 см.(Сетевые технологии) ISBN 978-5-91136-048-1. (1 экз.)
2. Агравал, Говинд П. Применение нелинейной волоконной оптики: учебное пособие: [для студентов вузов, обучающихся по техническим направлениям подготовки] / Говинд Агравал ; [пер. В.И. Кузина] ; под ред. д.ф.-м.н. И.Ю. Денисюка. Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2011, 591 с. : ил. ; 24 см(Учебники для вузов, Специальная литература) ISBN 978-5-8114-0999-0 (2 экз.)

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

1. Othonos, K. Kalli, Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing, Artech House Publishers, 1999
2. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. М; Наука, 1989.
3. Г. Агравал, Нелинейная волоконная оптика, Москва, Мир, 1996.
4. Е. М. Дианов, Волоконные лазеры, УФН, т.174, №10, стр.1139-1142, 2004.
5. Ю. Н. Кульчин, Распределенные волоконно-оптические измерительные системы, Москва, Наука, 2001.
6. М. Адамс, Введение в теорию оптических волноводов (Москва:Мир, 1984).
7. А. М. Желтиков, Оптика микроструктурированных волокон, Москва, Наука, 2004.

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

1. <http://www.iucr.org/iucr-top/>
2. *National Institute of Standard and Technology*. NIST, <https://www-s.nist.gov>.

7.2. Информационные справочные системы

Энциклопедия фотоники: <https://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>

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 «Волоконная оптика 2» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, итоговой 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 итоговой аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и итоговой аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем проведения коротких самостоятельных работ в начале каждого занятия с решением типовых задач, разобранных на предыдущем занятии. Студентам необходимо успешно выполнить две контрольные работы.

Промежуточная аттестация

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.

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

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 итоговой аттестации.

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 объекта исследования.	Знать теоретические основы волоконной оптики, технику волоконно-оптического эксперимента и основы базовых технологий, основные физические процессы, связанные с распространением света в волоконных световодах, как линейные, так и нелинейные.	Проведение самостоятельных работ в начале каждой лекции, решение контрольных работ, экзамен.

<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>Уметь объяснить принципы работы основных волоконно-оптических устройств и волоконно-оптических систем, в т.ч. систем связи и сенсорных систем на основе точечных (ВБР) и распределенных волоконных датчиков. Владеть выводом и решением нелинейного уравнения Шредингера, понятием солитона, описанием нелинейных эффектов при распространении коротких импульсов света в волоконных световодах и при преобразовании света (ВКР, ВРМБ).</p>	<p>Проведение самостоятельных работ в начале каждой лекции, решение контрольных работ, экзамен.</p>
---	---	---

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Волоконная оптика 2».

Таблица 10.2

Критери и оценива ния результат ов обучени я	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.	Демонстриру ет общие знания базовых понятий по темам/раздел ам 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.	Продемонстр ированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстриров аны 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

Примеры задач для самостоятельного решения

1. Оценить минимальную длительность импульса при синхронизации мод волоконного иттербиевого лазера с диапазоном усиления 1000-1100 нм (выше уровня потерь).
2. Найти длину волны и порог генерации ВКР-лазера на основе световода SMF-28 длиной 1 км с накачкой иттербиевым волоконным лазером (1060 нм) с кольцевым резонатором на основе ответвителя 70:30.

Контрольная работа № 1

1. Оценить максимальную энергию импульса при синхронизации мод волоконного иттербиевого лазера с центральной длиной волны 1030 нм и средней мощностью 100 мВт.
2. Сравнить нелинейную и дисперсионные длины при распространении импульса гауссовой формы длительностью 100 пс пиковой мощностью 0,1 Вт с центральной длиной волны 1550 нм в световоде SMF-28.
3. Сравнить нелинейную и дисперсионные длины при распространении импульса гауссовой формы длительностью 10 пс пиковой мощностью 1 Вт с центральной длиной волны 1550 нм в световоде SMF-28.
4. Оценить длительность солитона пиковой мощностью 1 Вт с центральной длиной волны 1550 нм в световоде с коэффициентом дисперсии $-10 \text{ пс}^2/\text{км}$.
5. Оценить характерную длину одномодового световода, на которой эффект нелинейного вращения поляризации импульса пиковой мощностью 1 кВт с центральной длиной волны 1050 нм сравним по величине со случайным двулучепреломлением (10^{-8}).

Контрольная работа № 2

3. Найти порог ВРМБ для излучения иттербиевого волоконного лазера (1,06 мкм) с шириной спектра 10 ГГц в световоде SMF-28 длиной 1 км.
4. Оценить период динамической решётки и величину сдвига частоты в процессе ВРМБ и для излучения эрбиевого волоконного лазером (1,55 мкм), если известна скорость звука в среде (10^5 см/с).

5. Оценить длину безрегенерационного участка волоконной линии связи для мощности передатчика 1 мВт, квантового предела приемника 10 нВт в зависимости от скорости передачи (1, 10, 100 Гб/с).
6. Для линии связи в волокне с потерями $\alpha = 0,2$ дБ/км протяженностью 1000 км число промежуточных усилителей составляет $N_0=10$. Определить число таких же усилителей N , которые обеспечили бы прежнее значение OSNR для линии 2000 км.
7. Оценить пространственное и температурное разрешение распределённого датчика температуры на основе комбинационного рассеяния импульсов мощностью 1 Вт и длительностью 10 нс на 1, 55 мкм в зависимости от длины волокна SMF-28 (0,1, 1 и 10 км).

Вопросы на экзамен

Тема 1. Волоконно-оптические датчики на основе ВБР

1. Точечные датчики температуры и деформаций на основе ВБР.
2. Спектральное и временное мультиплексирование ВБР
3. Применения ВБР-датчиков.

Тема 2. Распределенные волоконно-оптические датчики

1. Волоконные распределённые датчики на основе рефлектометрии КР.
2. Волоконные распределённые датчики на основе рефлектометрии ВРМБ.
3. Фазочувствительный рефлектометр на основе рэлеевского рассеяния.
4. Применения распределенных волоконно-оптических датчиков.

Тема 3,4. Дисперсия волокон. Теория линейных эффектов в оптоволокне

1. Материальная дисперсия, уравнение Зелмейера.
2. Нормальная и аномальная дисперсии
3. Линейное уравнение Шредингера.

Тема 5,6. Теория нелинейных эффектов в оптоволокне

1. Нелинейное уравнение Шредингера (НУШ)
2. Распространение импульсов, описываемое НУШ.
3. Фазовая само- и кросс-модуляция.
4. Солитоны. Модуляционная неустойчивость.
5. Поляризационные эффекты при распространении импульсов. Нелинейная эволюция поляризации (NPE).
6. Синхронизация мод волоконных лазеров: NPE, SESAM.
7. Режимы генерации и параметры фемтосекундных лазеров.

Тема 7. Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ).

1. Стоксов сдвиг ВРМБ. Линия усиления. Порог ВРМБ.
2. Волоконный ВРМБ-лазер.
3. Аналитическая модель ВРМБ. Решения: мощность прошедшей и отраженной волн.

Тема 8. Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР).

1. Описание процесса. Стоксов сдвиг и линия усиления. Порог ВКР.
2. Волоконный ВКР-лазер. Устройство. Принцип работы. Выходные параметры.

3. Каскадный ВКР-лазер. Аналитическая модель. Истощение накачки и последовательное насыщение мощности стоксовых волн.
4. Моды ВКР-лазера. Формирование спектра генерации.
5. Длинный волоконный ВКР-лазер. Предел длины резонатора. Рэлеевская обратная связь.

Тема 9. Удвоение частоты волоконных лазеров

1. I и II тип синхронизма в кристаллах. Периодически ориентированные кристаллы.
2. Особенности удвоения частоты волоконных лазеров. Однопроходная схема. Внутррезонаторное удвоение.
3. Удвоение большого количества мод со случайной фазой.
4. Генерация второй гармоники в волокне.

Тема 10, 11. Основные типы усилителей и их характеристики. Волоконные усилители

1. Основные типы усилителей.
2. Эрбиевые волокна для C и L-диапазонов: спектральные характеристики усиления и поглощения, различие параметров. Мощность накачки, длина, коэффициент усиления и рабочие длины волн.
3. Отношение сигнал/шум (SNR). Усиленное спонтанное излучение (ASE). Шумовой коэффициент (NF). Минимальное увеличение шума.
4. Распределённый ВКР-усилитель.

Тема 12, 13. Основы волоконно-оптической связи. Увеличение пропускной способности волоконно-оптических линий связи.

1. Основные элементы волоконно-оптических линий связи.
2. Ограничения при увеличении пропускной способности (потери и дисперсия, нелинейные эффекты). Протяженная ВОЛС с периодическим усилением. OSNR. Длина безрегенерационного участка, зависимость от скорости. Ограничение по дисперсии. Управление дисперсией.
3. БЕР. Глаз-диаграмма. Прямая коррекция ошибок. Форматы данных. Понятие спектральной эффективности.
4. Пропускная способность. Временное и спектральное уплотнение. Солитонные линии.

Пример экзаменационного билета

1. Теория: Каскадный ВКР-лазер. Аналитическая модель. Истощение накачки и последовательное насыщение мощности стоксовых волн.
2. Задача: Оценить минимальную длительность импульса при синхронизации мод волоконного эрбиевого лазера с диапазоном усиления 1530-1570 нм выше порога.

Оценочные материалы по итоговой 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 «Волоконная оптика 2»
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