

Приложение № 2 к Основной профессиональной образовательной программе высшего образования программа подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению подготовки кадров высшей квалификации 03.06.01 «Физика и астрономия» направленность «Оптика»

Федеральное агентство научных организаций

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

УТВЕРЖДАЮ

**Директор ИАиЭ СО РАН
академик А.М. Шалагин**

«16» сентября 2014 г.



Рабочая программа дисциплины

«НЕЛИНЕЙНАЯ ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА»

**Основная профессиональная образовательная программа высшего образования
Программа подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению
подготовки кадров высшей квалификации
03.06.01 «Физика и астрономия» направленность «Оптика»**

Форма обучения - очная

Новосибирск 2014 г.

Рабочая программа составлена на основании федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации) утвержденной приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30 июля 2014 г. №867

Составитель рабочей программы

Зам. директора, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.

Бабин С.А.

Рабочая программа утверждена на заседании Ученого совета ИАиЭ СО РАН

«16» сентября 2014 г., протокол №14-08

Председатель Ученого совета, академик, профессор

Шалагин А.М.

Секретарь Ученого совета, д.т.н.

Михляев С.В.

СОГЛАСОВАНО:

Вед. научн. сотр., д.ф.-м.н.

Ильичев Л.В.

1 Цели и задачи освоения дисциплины

Цели:

Дисциплина «Нелинейная волоконная оптика» (модуль оптика, индекс по учебному плану Б1.Б.3) является специальной дисциплиной подготовки аспирантов по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации) направленность «Оптика» и имеет своей целью овладение основными понятиями, моделями, теоретическими и экспериментальными методами нелинейной волоконной оптики и знакомство с современным состоянием данной области науки.

Задачи:

1. Углубленное изучение теоретических вопросов волоконной оптики в соответствии с требованиями ФГОС ВО (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки «Физика и астрономия».

2. Развитие практических навыков решения задач в области волоконной оптики и лазерной физики, применения оптических методов в системах анализа вещества, передачи и обработки информации, в технологических и измерительных оптических системах.

3. Формирование у аспирантов представления о современных фундаментальных и прикладных проблемах волоконной оптики, лазерной физики, проблемах приложения оптических методов исследования в науке, технике и биомедицине.

4. Формирование у аспирантов представления о теоретических основах нелинейного взаимодействия оптического излучения с веществом световода (кварцевым стеклом), включая вопросы когерентности лазерного излучения, а также об экспериментальных методах наблюдения нелинейных эффектов в волоконной оптике и их проявлений в лазерных системах измерения, обработки и передачи информации по оптоволокну.

5. Ознакомление аспирантов с научно-техническими достижениями в области волоконно-оптических телекоммуникационных и сенсорных систем.

2 Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы послевузовского профессионального образования (аспирантура)

Дисциплина «Нелинейная волоконная оптика» (модуль оптика) является обязательной, входит в состав Блока 1 «Дисциплины (модули)» и относится к базовой части ООП по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность «Оптика». Индекс дисциплины - Б1.Б.3. Курс «Нелинейная волоконная оптика» изучается на первом курсе аспирантуры и является следующей ступенью в изучении волоконной оптики после магистерского курса «Основы волоконной оптики»; изложение материала опирается также на знание аспирантами основ физической и нелинейной оптики и физики лазеров; обеспечена логическая связь курса «Нелинейной волоконной оптики» с другими курсами.

Взаимосвязь курса с другими дисциплинами ООП способствует углубленной подготовке аспирантов к решению специальных практических профессиональных задач и формированию необходимых компетенций

3 Требования к уровню подготовки аспиранта, завершившего изучение данной дисциплины

В результате освоения дисциплины «Нелинейная волоконная оптика» обучающийся должен обладать следующими компетенциями:

Код компетенции	Формулировка компетенции из ФГОС	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)
УК-1	способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	уметь анализировать текущие исследовательские задачи и полученные результаты, иметь способность предлагать решение поставленных задач, знать принципы работы волоконно-оптических сенсорных и телекоммуникационных систем
УК-3	готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач	владеть навыками постановки и проведения научных исследований, знать международное и российское положение по изучаемому направлению
УК-5	способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития	уметь планировать и решать поставленные задачи; уметь оценивать и рассчитывать основные физические процессы при распространении, усилении и генерации света в пассивных и активных световодах и волоконных лазерах
ОПК-1	способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий	четко и уверенно излагать содержание выполненных исследований, аргументировано отвечать на вопросы и вести научную дискуссию ; уметь использовать современные приборы и технологии для проведения исследований и обработки полученных результатов; Знать основные физические процессы, связанные с распространением интенсивного (лазерного) излучения в волоконных световодах, как линейные, так и нелинейные.
ОПК-2	готовностью к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования	Знать основные образовательные программы; уметь объяснить принципы работы основных волоконно-оптических устройств и систем
ПК-1	способность к теоретическим исследованиям в области волновой и квантовой оптики, волоконной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии,	Умение проводить теоретические исследования в области волновой и квантовой оптики, волоконной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии, оптической обработки информации, оптических методов

	оптической обработки информации, оптических методов измерения и контроля	измерения и контроля. Знать теоретические основы нелинейной волоконной оптики.
ПК-2	способность разрабатывать теоретические модели и выполнять численное моделирование оптических процессов в классических и квантовых системах	Уметь разрабатывать теоретические модели и выполнять численное моделирование оптических процессов в классических и квантовых системах. Знать: • волновое уравнение: вывод и решение, моды световода; • потери, дисперсия и нелинейность разнородной физической природы; • теория связанных мод, взаимодействие мод в волоконных ответвителях и брэгговских решётках, теоретические методы описания элементов волоконных лазеров и их особенностей в сравнении с лазерами на дискретных элементах. • вывод и решение нелинейного уравнения Шредингера • солитоны, диссипативные солитоны; • формирование и распространение сверхкоротких (фемтосекундных) импульсов света, спонтанное и вынужденное рассеяние света в световодах (Рэлея, Манделъштам-Бриллюэна, ВКР)
ПК-3	способность к постановке и проведению экспериментальных исследований с использованием волоконно-оптических систем, аналоговых и цифровых систем записи и обработки сигналов и изображений	Умение проводить экспериментальные исследования с использованием волоконно-оптических систем, аналоговых и цифровых систем записи и обработки сигналов и изображений. Владеть практическими навыками работы с волоконными световодами, усилителями и лазерами. Знать: - технику эксперимента и основы базовых технологий нелинейной волоконной оптики, - принципы работы основных волоконно-оптических устройств и систем, работающих на принципах нелинейной волоконной оптики.

4 Объем дисциплины, содержание и структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет **6** зачетных единицы, **216** часов.

Тема	Лекции, (ч)	Самостоят. работа, (ч)	Формы контроля
Год обучения 1			
Раздел 1. Основные понятия волоконной оптики			
<i>Введение в предмет. Цели и задачи курса, его общая структура. Определения: фотоника, волоконная оптика (ВО), микро- и</i>	2	4	

нанотехнологии в оптике. Краткая история создания волоконных световодов и развития ВО.			
<i>Устройство волоконного световода, распространение света.</i> Устройство волоконного световода (ВС). Описание распространения света в рамках геометрической оптики. Полное внутреннее отражение. Числовая апертура. Оптические потери в световодах. Минимально достижимый уровень потерь.	2	4	
<i>Дисперсия и нелинейность в волоконных световодах.</i> Материальная дисперсия, формула 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). Волокна со сглаженной и сдвинутой дисперсией, с высокой и низкой нелинейностью.	2	4	
Раздел 2. Моды волоконного световода.			
<i>Волновое уравнение (ВУ)</i> Вывод и решение. Моды сердцевины, поле в оболочке, сшивки. Направляемые моды и моды утечки. Эффективный показатель преломления, константа распространения. Параметр V. Длина волны отсечки. Многомодовый и одномодовый режимы. Гауссова аппроксимация основной моды, диаметр поля моды. Поляризация моды. Двухлучепреломление в волокне, длина биений. Дисперсия поляризационных мод. Световоды, сохраняющие поляризацию.	2	4	Реферат
<i>Теория связанных мод для сонаправленных волн.</i> Волоконные разветвители. Решение ВУ для волоконного ответвителя. Спектрально-селективные разветвители (WDM).	2	4	
<i>Волоконные интерферометры.</i> Интерферометр (зеркало) Саньяка. Интерферометр Маха-Цандера, электро-оптический модулятор. Волоконный контроллер поляризации. Волоконный поляризатор, изолятор и циркулятор.	2	4	Зачет
Раздел 3. Волоконные брэгговские решётки (ВБР)			
<i>Теория ВБР.</i> Уравнения для со- и противонаправленных связанных мод. Однородная решетка. Т-матрица. Точные соотношения теории рассеяния. Понятие об обратной задаче рассеяния.	2	4	
<i>Методы записи ВБР.</i> Типы фоточувствительности волокон: 0, I, IIa, II. Механизмы фоточувствительности: ГКДЦ, уплотнение. Методы записи и характеристики ВБР.	2	4	
<i>Основные типы ВБР и их применения.</i>	2	4	

Однородная решётка. Аподизация, фазовый сдвиг, чирп, наклон. Гауссова решётка. Перестройка ВБР. Длиннопериодные решётки (ДПР). Применения ВБР и ДПР. Нелинейный режим ВБР и ДПР.			
Раздел 4. Волоконные усилители и лазеры			
<i>Принципы построения волоконных лазеров.</i> Сравнение волоконных и дискретных лазеров. Волокна, легирующие примеси. Способы накачки. ЛД, WDM ответвители. Волокно с двойной оболочкой, объединитель накачек. Резонаторы волоконных лазеров: кольцевое зеркало (Саньяка), ВБР, кольцевой резонатор. Нелинейный режим кольцевого зеркала.	2	4	Реферат
<i>Модель волоконных усилителей и лазеров.</i> Трехуровневая и квазидвухуровневая система. Коэффициент усиления и его насыщение с ростом мощности. Порог и дифференциальная эффективность генерации в линейном и кольцевом резонаторе, оптимальная длина. Лазер на основе световода с двойной оболочкой.	2	4	
<i>Типы активных волокон и усилителей на их основе.</i> Спектроскопия ионов Yb, Er, Nd, Tm, Ho в стекле. Иттербиевый волоконный усилитель и лазер. Неодимовый волоконный усилитель и лазер. Эрбиевый и эрбий-иттербиевый волоконный усилитель и лазер. Другие примеси (тулий, гольмий, висмут).	2	4	
<i>Типы волоконных лазеров.</i> Одночастотные и перестраиваемые волоконные лазеры. Импульсные волоконные лазеры. Лазеры с модуляцией добротности и синхронизацией мод резонатора.	2	4	
<i>Волоконные лазеры с распределенной обратной связью (РОС).</i> Теория волоконного РОС-лазера. Основные характеристики волоконных РОС-лазеров (Yb, Er, Tm).	2	4	Зачет
Раздел 5. Керровская нелинейность и солитоны в оптоволокне			
<i>Обобщённое нелинейное уравнение Шредингера.</i> Керровская нелинейность, классификация эффектов: само- и кросс модуляция фазы. Модуляционная неустойчивость. Солитоны.	2	4	
<i>Нелинейные поляризационные эффекты.</i> Нелинейное вращение поляризации (НВП). Лазеры с синхронизацией мод на эффекте НВП, другие варианты синхронизации мод.	2	4	
<i>Диссипативные солитоны.</i> Описание волоконного лазера с синхронизацией мод на основе обобщенного уравнения Гинзбурга-Ландау.	2	4	Реферат

Раздел 6. Рассеяние света в оптоволокне в линейном и нелинейном режимах			
<i>Физика явлений и основные характеристики</i> рассеяния Рэлея, Манделъштам-Бриллюэна и комбинационного рассеяния (КР). Спонтанное и вынужденное рассеяние.	2	4	
<i>Вынужденное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна (ВРМБ).</i> Стоксов сдвиг. Линия усиления. Порог ВРМБ. Истощение накачки. Насыщение усиления. ВРМБ-зеркало. Стоксовы линии высоких порядков. Волоконный ВРМБ-усилитель и ВРМБ-лазер.	2	4	
<i>Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР).</i> Стоксов сдвиг и линия усиления. Порог ВКР. Волоконный ВКР-лазер. Устройство. Принцип работы. Достижимые параметры.	2	4	
<i>Балансная модель волоконного ВКР-лазера.</i> Истощение накачки и последовательное насыщение мощности стоксовых волн.	2	4	Реферат
<i>Нелинейное уширение спектра генерации ВКР-лазера.</i> Моды резонатора. Модель слабой волновой турбулентности. Сверхдлинный волоконный ВКР-лазер с резонатором на основе ВБР и/или случайной распределенной обратной связи на рэлеевском рассеянии.	2	4	
Раздел 7. Нелинейное преобразование частоты волоконных лазеров			
<i>Удвоение частоты волоконных лазеров.</i> Нелинейные кристаллы, синхронизм. Периодически ориентированные кристаллы, квази-синхронизм. Генерация второй гармоники (ГВГ) в однопроходной схеме. Внутррезонаторная ГВГ. ГВГ большого количества мод со случайной фазой. ГВГ в полингманном волоконном световоде.	2	4	
<i>Параметрическая генерация в нелинейных волокнах.</i> Условия синхронизма для четырех-волнового смешения. Скалярный и векторный синхронизм в двулучепреломляющих (обычных и фотонно-кристаллических) нелинейных волокнах (НВ). Параметрическое усиление и генерация в НВ для стоксовой и анти-стоксовой волн. Особенности импульсного и непрерывного режимов параметрической генерации.	2	4	
<i>Генерация суперконтинуума (СК).</i> Основные физические процессы при генерации суперконтинуума: самосдвиг частоты, фазовая самомодуляция, четырех-волновое смешение. Описание процесса генерации СК на основе обобщенного нелинейного уравнения Шредингера. Применения СК.	2	4	Зачет

Раздел 8. Волоконно-оптическая связь			
<i>Основные элементы волоконно-оптических линий связи. Источники излучения. Приемники излучения. Оптическое волокно, волоконно-оптический кабель. Потери. Волоконные усилители (эрбиевый и рамановский), мощность насыщения, коэффициент усиления и шум-фактор (NF). Протяженная ВОЛС с периодическим усилением. Отношение сигнал-шум (OSNR).</i>	2	4	
<i>Временное и спектральное уплотнение каналов. Линейный и нелинейный режим передачи сигнала, солитонные линии связи. Частота ошибок (BER). Прямая коррекция ошибок. Глаз-диаграмма. Форматы данных. Понятие спектральной эффективности. Когерентная связь, суперканал.</i>	2	4	
Раздел 9. Волоконно-оптические сенсорные системы			
<i>Точечные волоконно-оптические датчики. Точечные датчики температуры и деформаций на основе ВБР и ИФП. Численные коэффициенты, оценки чувствительности. Методы детектирования. Спектральное и временное мультиплексирование. Квази-распределённые сенсорные системы. Применения ВБР-датчиков. Умные композиты.</i>	2	4	
<i>Распределенные волоконно-оптические датчики. Волоконно-оптический рефлектометр. Фазочувствительный рефлектометр. Распределенные системы регистрации внешних воздействий. Распределенные системы измерения температуры и деформаций на основе ВКР и ВРМБ. Применения волоконно-оптических датчиков.</i>	2	4	Экзамен

В учебном процессе используются активные и интерактивные формы занятий в сочетании с внеаудиторной работой. Удельный вес занятий, проводимых в интерактивных формах, составляет не менее 30% аудиторных занятий.

В рамках изучения данной дисциплины реализация компетентного подхода предусматривает широкое использование в учебном процессе традиционных образовательных технологий, активных и интерактивных форм проведения занятий в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

В рамках изучения данной дисциплины используются: мультимедийные образовательные технологии: интерактивные лекции (презентации).

5 Самостоятельная работа аспирантов

Основной формой деятельности аспирантов по дисциплине является самостоятельная проработка конспектов лекций и вопросов, вынесенных на самостоятельное изучение, с помощью основной и дополнительной литературы с привлечением компьютерных средств, а также индивидуальные занятия с преподавателем, направленные на практические исследования по представленным темам. Компьютерные демонстрации формирования моды и распространения излучения в световоде, лабораторные демонстрации основных волоконно-оптических устройств, обязательное участие в заседаниях еженедельного семинара Учебно-научного центра «Квантовая оптика».

Вопросы для самостоятельного изучения:

Раздел 1. Основные понятия волоконной оптики

1. Изучить и сравнить основные методы изготовления заготовок (MCVD, OVD, VAD) и вытяжки волоконных световодов, их преимущества и недостатки.
2. Оценить потери при сочленении волоконных световодов с разным размером сердцевины и потери на изгибе световода с заданным радиусом кривизны.
3. Вывести формулы для величины межмодовой дисперсии в многомодовых волоконных световодах, получить оценку предельной длины многомодовой линии связи.

Раздел 2. Моды волоконного световода.

1. Оценить количество мод в многомодовом волоконном световоде по его параметрам.
2. Вывести выражение для коэффициента отражения волоконного зеркала Саньяка в зависимости от коэффициента ветвления

Раздел 3. Волоконные брэгговские решётки (ВБР)

1. Вывести формулу для брэгговской длины волны отражения ВБР.
2. Оценить амплитуду и период боковых резонансов при аподизации ВБР гауссовой функцией.

Раздел 4. Волоконные усилители и лазеры

1. Оценить длину резонатора волоконного лазера, достаточную для селекции одной продольной моды при использовании в качестве зеркал ВБР с заданными характеристиками.
2. Теоретически сравнить результаты аналитической модели генерации волоконных лазеров в кольцевом и линейном резонаторе при прочих равных условиях.
3. Сравнить параметры волоконных лазеров (эрбиевых, иттербиевых) с их твердотельными аналогами, сформулировать основные преимущества и недостатки волоконных лазеров.

Раздел 5. Керровская нелинейность и солитоны в оптоволокне

1. 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.

2. Оценить минимальную длительность импульса при синхронизации мод волоконного иттербиевого лазера с диапазоном усиления 1000-1100 нм (выше уровня потерь).

3. Оценить длительность солитона пиковой мощностью 1 Вт с центральной длиной волны 1550 нм в световоде с коэффициентом дисперсии $-10 \text{ пс}^2/\text{км}$.

Раздел 6. Рассеяние света в оптоволокне в линейном и нелинейном режимах

1. 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.

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.

Раздел 7. Нелинейное преобразование частоты волоконных лазеров

1. Сравнить отношение эффективности генерации второй гармоники для случаев идеального синхронизма и квази-синхронизма с периодической компенсацией набега фазы.

2. Оценить и сравнить порог параметрической генерации в однопроходной и резонаторной схемах.

Раздел 8. Волоконно-оптическая связь

1. 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).

2. Для линии связи в волокне с потерями $\alpha = 0,2 \text{ дБ/км}$ 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.

Раздел 9. Волоконно-оптические сенсорные системы

1. 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).

2. Изучить базовые принципы волоконных акустических датчиков, эффект Саньяка и волоконные гироскопы.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Основная литература:

1. Кульчин Ю.Н. Современная оптика и фотоника нано- и микросистем – Физматлит, 2015.
2. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. – Физматлит, 2001.
3. Делоне Н.Б. Нелинейная оптика. – Физматлит, 2003.

Дополнительная литература:

1. A. 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. Akhmediev, N. and & Ankiewicz, A. Dissipative solitons: From optics to biology and medicine. - Springer, 2008.
4. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения, пер. с англ. В 2 т. - М.: Изд-во «Интеллект», 2012. Т.1. 760 с. Т2. 784 с.
5. Michel J.F. Dignonet. Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers, Revised and Expanded. - CRC Press, 2001
6. Григорьянц А.Г., Васильцов В.В. Пространственная структура излучения волноводных и волоконных технологических лазеров. - МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014

Методическая литература:

Методическое пособие по написанию реферата, ИАиЭ.

Научные статьи:

1. Е. М. Дианов, Волоконные лазеры, УФН, т.174, №10, стр.1139-1142, 2004
2. Е. М. Дианов, Волоконная оптика: сорок лет спустя. Квантовая электроника, т.40, №1, стр.1-6, 2010.
3. Grelu, Ph., Akhmediev, N. Dissipative solitons for mode-locked lasers. Nature Photonics v.6, pp.84-92 (2012).
4. S. K. Turitsyn, S. A. Babin, D. V. Churkin, I. D. Vatnik, M. Nikulin, E. V. Podivilov. Random distributed feedback fibre lasers. Phys. Reports, v.542, N2, pp.133–193, 2014.

Интернет-ресурсы:

1. Электронный справочник по "Оптике когерентного излучения" (с разделом "4.2. Цифровая голография") <http://optics.sinp.msu.ru/co/toc.html>

2. Ресурсы Wikipedia (волоконная оптика):

https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BE%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0

3. Ресурсы Энциклопедия фотоники:

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

Веб-сайты с электронными ресурсами:

1. eLIBRARY.RU [Электронный ресурс]: научная электронная библиотека. – URL: <http://www.elibrary.ru>

2. ibooks.ru [Электронный ресурс]: электронно-библиотечная система. – URL: <http://ibooks.ru>

3. Издательство «Лань» [Электронный ресурс]: электронно-библиотечная система. – URL: <http://e.lanbook.com/>
4. Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов [Электронный ресурс]. – URL: <http://scool-collection.edu.ru>
5. Единое окно доступа к образовательным ресурсам [Электронный ресурс]. – URL: <http://window.edu.ru>
6. Znanium.com [Электронный ресурс]: электронно-библиотечная система. – URL: <http://znanium.com>
7. Антиплагиат [Электронный ресурс]. – Режим доступа – URL: <http://www.antiplagiat.ru/index.aspx>
8. Электронная библиотека СГУ <http://library.sgu.ru/>
9. Электронная библиотека физико-технического института им. А.И. Иоффе. Санкт-Петербург http://www.rasl.ru/b_resours/set/fismat_set/ftispb.php
10. Электронная полнотекстовая библиотека Ихтика http://ihtik.lib.ru/2011.08_ihtik_nauka-tehnika/

Программное обеспечение:

OS MS Windows, MS Office 2007, Adobe Reader.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Обучение аспирантов происходит в Учебном центре Института автоматизации и электрометрии СО РАН, созданном совместно Новосибирским университетом. Учебный центр состоит из трех классов, в которых проходят лекционные занятия, а также классы доступны более 30 часов в неделю для самостоятельной подготовки аспирантов. Классы укомплектованы 20 компьютерами, оснащены оборудованием для проведения практических и лабораторных занятий (программирование микроконтроллеров, практикум по схемотехнике с использованием паяльного оборудования) и оборудован системой вентиляции. В классах имеется демонстрационное оборудование (мультимедиа- и оверхед-проекторы) и звуковая система для проведения видеоконференций.

8. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

Формы текущего контроля работы аспирантов

Формами текущего контроля работы аспирантов по дисциплине «Нелинейная волоконная оптика» являются: зачет по вопросам к самостоятельной работе, реферат.

Порядок осуществления текущего контроля

Текущий контроль выполнения заданий осуществляется регулярно, начиная с 3 недели учебного года. Контроль и оценивание выполнения рефератов осуществляется по завершению тем.

Система текущего контроля успеваемости служит в дальнейшем наиболее качественному и объективному оцениванию в ходе промежуточной аттестации.

Промежуточная аттестация по дисциплине

Промежуточная аттестация проводится в форме зачета (два в первом полугодии и один во втором).

Вопросы к зачётам.

1. Краткая история создания волоконных световодов и развития ВО.
2. Устройство волоконного световода. Распространение света в рамках геометрической оптики.
3. Полное внутреннее отражение. Числовая апертура.
4. Оптические потери в световодах. Минимально достижимый уровень потерь.
5. Дисперсия и нелинейность в волоконных световодах. Материальная дисперсия, формула Зелмейера. Волноводная дисперсия. Нормальная и аномальная дисперсии.
6. Одномодовые и многомодовые волокна. Межмодовая дисперсия.
7. Типы нелинейностей в световодах: ВРМБ и ВКР, керровская нелинейность (SPM, XPM, FWM). Волокна со сглаженной и сдвинутой дисперсией, с высокой и низкой нелинейностью.
8. Одночастотные и перестраиваемые волоконные лазеры.
9. Импульсные волоконные лазеры. Лазеры с модуляцией добротности и синхронизацией мод резонатора.
10. Удвоение частоты волоконных лазеров. Нелинейные кристаллы, синхронизм.
11. Периодически ориентированные кристаллы, квази-синхронизм. Генерация второй гармоники (ГВГ) в однопроходной схеме. Внутррезонаторная ГВГ.
12. ГВГ большого количества мод со случайной фазой. ГВГ в полингванном волоконном световоде.
13. Параметрическая генерация в нелинейных волокнах.
14. Условия синхронизма для четырех-волнового смешения. Скалярный и векторный синхронизм в двулучепреломляющих (обычных и фотонно-кристаллических) нелинейных волокнах (НВ).
15. Параметрическое усиление и генерация в НВ для стоксовой и анти-стоксовой волн. Особенности импульсного и непрерывного режимов параметрической генерации.
16. Генерация суперконтинуума (СК). Основные физические процессы при генерации суперконтинуума: самосдвиг частоты, фазовая самомодуляция, четырех-волновое смешение.
17. Описание процесса генерации СК на основе обобщенного нелинейного уравнения Шредингера. Применения СК.

Вопросы к экзамену.

1. Описание распространения света в рамках геометрической оптики. Полное внутреннее отражение. Числовая апертура.

2. Оптические потери в световодах (поглощение, рассеяние). Их спектральная зависимость. Характерные значения.
3. Дисперсия групповых скоростей (материальная, волноводная). Характерные значения и зависимость от длины волны. Область нормальной и аномальной дисперсии.
4. Волокна со ступенчатым профилем показателем преломления. Одномодовые и многомодовые волокна. Межмодовая дисперсия.
5. Градиентные световоды: уравнение распространения, решение. Компенсация межмодовой дисперсии.
6. Нелинейность. Выражение $n(I)$, нелинейная восприимчивость разных порядков. Типы нелинейностей в световодах.
7. Уравнения Максвелла. Волновое уравнение.
8. Характеристическое уравнение, моды сердцевин. Поле в оболочке, сшивка. Направляемые моды, моды утечки.
9. Длина волны отсечки. Оценка для стандартного телекоммуникационного волокна. Параметр V . Количество мод.
10. Свойства одномодовых волокон. Распределение поля моды. Гауссова аппроксимация поля моды. Радиус поля моды. Эффективная площадь моды.
11. Поляризационные моды одномодового волокна. Двулучепреломление в волокне, длина биений. Дисперсия поляризационных мод. Световоды, сохраняющие поляризацию.
12. Соединение волокон. Согласование мод, формулы для потерь на стыке.
13. Уравнения связанных мод для сонаправленных волн. Ответвитель.
14. Интерферометр Саньяка, loop mirror. Интерферометр Маха-Цандера.
15. Принципы работы волоконного изолятора и циркулятора. Волоконный контроллер поляризации.
16. Уравнения связанных мод для ВБР. Т-матрица. Решение для однородной (прямоугольной) волоконной брэгговской решётки (ВБР).
17. Причины формирования боковых резонансов ВБР, оценка их ширины, способы подавления.
18. Уровни энергии и переходы Y_b , E_g в волокне.
19. Насыщение усиления волоконного лазера. Модель генерации ВЛ.
20. Обобщённое нелинейное уравнение Шредингера (НУШ). Дисперсия. Нелинейные эффекты: самомодуляция фазы, фазовая кросс-модуляция, четырехволновое смешение.
21. Распространение импульсов, описываемое НУШ. Солитоны. Модуляционная неустойчивость.
22. Поляризационные эффекты при распространении импульсов. Нелинейная эволюция поляризации (NPE).

23. Синхронизация мод волоконных лазеров: NPE, SESAM. Режимы генерации и параметры фемтосекундных лазеров.
24. Вынужденное комбинационное рассеяние в волокне. Стоксов сдвиг и линия усиления. Порог ВКР.
25. Каскадный ВКР-лазер. Аналитическая модель. Истощение накачки и последовательное насыщение мощности стоксовых волн.
26. Моды ВКР-лазера. Формирование спектра генерации.
27. Длинный волоконный ВКР-лазер. Предел длины резонатора.
28. Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ). Стоксов сдвиг. Линия усиления. Порог ВРМБ. Волоконный ВРМБ-лазер.
29. Аналитическая модель ВРМБ. Решения: мощность прошедшей и отраженной волн. Проявления ВРМБ в усилителях.
30. Особенности удвоения частоты волоконных лазеров. I и II тип синхронизма. Периодически ориентированные кристаллы. Однопроходная схема. Внутррезонаторное удвоение.
31. Волоконные усилители. Эрбиевые волокна для C и L-диапазонов: спектральные характеристики усиления и поглощения, различие параметров. Мощность накачки, длина, коэффициент усиления и рабочие длины волн.
32. Отношение сигнал/шум (SNR). Усиленное спонтанное излучение (ASE). Шумовой коэффициент (NF). Минимальное увеличение шума.
33. 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.
34. БЕР. Глаз-диаграмма. Прямая коррекция ошибок. Форматы данных. Понятие спектральной эффективности.
35. Пропускная способность. Временное и спектральное уплотнение. Солитонные линии связи.
36. Волоконные датчики и сенсорные системы на основе ВБР.
37. Волоконные распределённые датчики на основе рефлектометрии КР.

Задачи к экзамену

1. На вход волоконной линии длиной 30 км подается излучение на двух длинах волн $\lambda_1 = 1,55$ мкм и $\lambda_2 = 1,5$ мкм мощностью 10 мВт каждое. Затухание на этих длинах волн составляет $\alpha_1 = 0,2$ дБ/км и $\alpha_2 = 0,3$ дБ/км. В конце линии волны разделяются спектрально-

селективным ответвителем, который вносит $\delta_{1,2}=1$ дБ для каждой волны. Найти выходную мощность для каждой из волн.

2. На вход волоконной линии длиной 30 км подается излучение с длиной волны $\lambda = 1,55$ мкм мощностью 100 мВт. Затухание волны составляет $\alpha=0,2$ дБ/км. В конце линии волна разделяется на две ответвителем с коэффициентом $T=0,1$, который вносит потери $\delta=1$ дБ для каждой из двух волн. Найти выходную мощность для каждой из волн.

3. Дисперсия световода составляет $D=20$ пс/(км нм) на длине волны 1,55 мкм. Найти максимальную длину световода при скорости передачи сигнала 100 Гб/с.

4. Дисперсия световода составляет $D=20$ пс/(км нм) на длине волны 1,55 мкм. Найти максимальную длину световода при скорости передачи сигнала 10 Гб/с.

5. Найти максимальную скорость передачи сигнала по многомодовому световоду со ступенчатым профилем показателя преломления числовой апертурой $NA=0,25$ длиной 1 км.

6. Найти разность плеч волоконного интерферометра Маха-Цандера, необходимую для селекции длин волн излучения с разницей частот 10 ГГц в области 1,5 мкм.

7. Оценить потери при соединении двух световодов SMF-28 разъемным соединением с поперечным смещением оси световода на 1 мкм.

8. Оценить изгибные потери на катушке из 10 витков диаметром 1 см для световода SMF-28.

9. Иттербиевый лазер с длиной волны 1 мкм выполнен на основе кольцевого резонатора и брэгговской решётки с параметрами $\Delta n=10^{-4}$ $L=10$ см. Найти радиус кольца, чтобы в лазере генерировалась одна продольная мода.

10. Найти параметр качества M^2 выходного пучка эрбиевого волоконного лазера с длиной волны 1,5 мкм, выполненного на основе световода с параметрами $NA=0,13$ $2a=8,4$ мкм.

11. Иттербиевый лазер с длиной волны 1 мкм выполнен на основе кольцевого резонатора и брэгговской решётки с параметрами $\Delta n=10^{-4}$ $L=10$ см. При какой длине резонатора в лазере будет генерироваться одна продольная мода.

12. Найти коэффициент пропускания резонатора эрбиевого лазера с длиной волны 1,5 мкм, если вывод излучения осуществляется через кольцевое зеркало на основе ответвителя с коэффициентом ветвления 70:30.

13. Оценить длину линейного резонатора эрбиевого лазера с длиной волны 1,5 мкм, в котором будет селектироваться одна продольная мода при использовании в качестве зеркал ВБР с шириной спектра 0,1 нм.

14. Оценить минимальную длительность импульса при синхронизации мод волоконного эрбиевого лазера с диапазоном усиления 1530-1570 нм (выше уровня потерь).

15. Оценить максимальную энергию импульса при синхронизации мод волоконного иттербиевого лазера с центральной длиной волны 1130 нм и средней мощностью 100 мВт.
16. Оценить максимальную энергию импульса при синхронизации мод волоконного эрбиевого лазера с центральной длиной волны 1550 нм и средней мощностью 100 мВт.
17. 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.
18. 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.
19. Оценить длительность солитона пиковой мощностью 1 Вт с центральной длиной волны 1550 нм в световоде с коэффициентом дисперсии $-10 \text{ пс}^2/\text{км}$.
20. 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}).
21. 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.
22. Найти порог ВРМБ для излучения иттербиевого волоконного лазера (1,06 мкм) с шириной спектра 10 ГГц в световода SMF-28 длиной 1 км.
23. 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).
24. Сравнить отношение эффективности генерации второй гармоники для случаев идеального синхронизма и квази-синхронизма с периодической компенсацией набега фазы.
25. 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).
26. Для линии связи в волокне с потерями $\alpha = 0,2 \text{ дБ/км}$ 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.
27. 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).

Темы рефератов.

1. Устройство и методы изготовления волоконных световодов.
2. Особенности фотонно-кристаллических волоконных световодов.
3. Волоконные разъемы и другие соединения световодов для систем оптической связи.
4. Принцип работы и сравнительный анализ обычного и спектрально-селективного волоконного ответвителя.
5. Методы записи ВБР.
6. Схемы и принципы работы волоконного лазера.
7. Зеркала волоконного лазера, основные схемы резонатора (линейный, кольцевой).
8. Способы накачки волоконных лазеров. Световедущая оболочка, накачка в оболочку. Объединители накачки.
9. Волоконный лазер с модуляцией добротности (устройство и принцип действия).
10. Волоконный лазер с распределенной обратной связью (устройство и принцип действия).
11. Волоконный ВКР-лазер. Устройство. Принцип работы. Выходные параметры.
12. Волоконный лазер с рэлеевской обратной связью.
13. Возможности генерации второй гармоники в волокне.
14. Волоконно-оптические линии связи. Основные элементы волоконно-оптических линий связи.
15. Применение распределённого ВКР-усилителя в оптической связи.
16. Фазочувствительный рефлектометр на основе рэлеевского рассеяния.

Критерии оценивания.

<i>Зачтено</i>	<i>Не зачтено</i>
<p>Успешное и системное владение навыками:</p> <ul style="list-style-type: none"> - выбора методов решения теоретических задач, - сбора, обработки, анализа и систематизации знаний о физических явлениях в области волновой и квантовой оптики, волоконной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии, оптической обработки информации, оптических методов измерения и контроля. - постановки и проведения экспериментальных исследований с использованием оптических систем, аналоговых и цифровых систем записи и обработки сигналов и изображений <p>Сформированные и системные умения применять:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основные физические положения волновой и квантовой оптики, волоконной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии, оптической обработки информации, оптических методов измерения и контроля в решении теоретических задач; - математический аппарат, компьютерные программные средства для теоретического и численного моделирования оптических процессов 	<p>Фрагментарное владение навыками:</p> <ul style="list-style-type: none"> - выбора методов решения теоретических задач; - сбора, обработки, анализа и систематизации знаний о физических явлениях в области волновой и квантовой оптики, волоконной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии, оптической обработки информации, оптических методов измерения и контроля; - постановки и проведения экспериментальных исследований с использованием оптических систем, аналоговых и цифровых систем записи и обработки сигналов и изображений; <p>Фрагментарные умения применять:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основные физические положения волновой и квантовой оптики, волоконной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии, оптической обработки информации, оптических методов измерения и контроля в решении теоретических задач; - математический аппарат, компьютерные программные средства для теоретического и численного моделирования оптических

<p>в классических и квантовых системах;</p> <ul style="list-style-type: none"> - теоретические положения физических процессов в оптических системах в экспериментальных исследованиях; - оптические системы, аналоговые и цифровые системы записи и обработки сигналов в экспериментальных исследованиях. <p>Сформированные и системные знания:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основных физических положений волновой и квантовой оптики, волоконной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии, оптической обработки информации, оптических методов измерения и контроля; - физических и математических основ теоретического и численного моделирования оптических процессов в классических и квантовых системах; - физических основ функционирования оптических систем и электронных систем регистрации оптических сигналов; - методов и средств экспериментальных оптических исследований с использованием аналоговых и цифровых систем записи, обработки сигналов и изображений. 	<p>процессов в классических и квантовых системах;</p> <ul style="list-style-type: none"> - теоретические положения физических процессов в оптических системах в экспериментальных исследованиях; - оптические системы, аналоговые и цифровые системы записи и обработки сигналов в экспериментальных исследованиях. <p>Фрагментарные знания:</p> <ul style="list-style-type: none"> - основных физических положений волновой и квантовой оптики, волоконной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии, оптической обработки информации, оптических методов измерения и контроля; - физических и математических основ теоретического и численного моделирования оптических процессов в классических и квантовых системах; - физических основ функционирования оптических систем и электронных систем регистрации оптических сигналов; - методов и средств экспериментальных оптических исследований с использованием аналоговых и цифровых систем записи, обработки сигналов и изображений.
<p>Отметка «зачтено» ставится аспирантам, успешно выполнившим в процессе обучения все текущие задания, полностью и обоснованно ответившие на вопросы промежуточной аттестации в соответствии с нижеприведенными критериями оценивания результатов обучения.</p> <p>Сформированные знания:</p> <ul style="list-style-type: none"> - современных способов использования информационно-коммуникационных технологий в выбранной сфере деятельности; - основных физических положений волновой и квантовой оптики, волоконной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии, оптической обработки информации, оптических методов измерения и контроля; - физических и математических основ теоретического и численного моделирования оптических процессов в классических и квантовых системах; - физических основ функционирования оптических систем и электронных систем регистрации оптических сигналов; - методов и средств экспериментальных оптических исследований с использованием аналоговых и цифровых систем записи, обработки сигналов и изображений. <p>Сформированные умения:</p> <ul style="list-style-type: none"> - выделять и систематизировать основные идеи в научной литературе; - применения основных физических положений волновой и квантовой оптики, волоконной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии, оптической обработки информации, оптических методов измерения и контроля в решении теоретических задач; - применения математического аппарата, компьютерных программных средств для теоретического и численного моделирования 	<p>Отметка «не зачтено» ставится аспиранту, не выполнившему в полном объеме все текущие задания или допустившие существенные неточности при ответе на вопросы, не сумевшие обосновать ответы в соответствии с ниже приведенными критериями оценивания результатов обучения.</p> <p>Фрагментарные знания:</p> <ul style="list-style-type: none"> - современных способов использования информационно-коммуникационных технологий в выбранной сфере деятельности; - основных физических положений волновой и квантовой оптики, волоконной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии, оптической обработки информации, оптических методов измерения и контроля; - физических и математических основ теоретического и численного моделирования оптических процессов в классических и квантовых системах; - физических основ функционирования оптических систем и электронных систем регистрации оптических сигналов; - методов и средств экспериментальных оптических исследований с использованием аналоговых и цифровых систем записи, обработки сигналов и изображений. <p>Фрагментарные умения:</p> <ul style="list-style-type: none"> - выделять и систематизировать основные идеи в научной литературе; - применения основных физических положений волновой и квантовой оптики волоконной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии, оптической обработки информации, оптических методов измерения и контроля в решении теоретических задач; - применения математического аппарата, компьютерных программных средств для теоретического и численного моделирования оптических процессов в классических и

<p>оптических процессов в классических и квантовых системах;</p> <ul style="list-style-type: none"> - применять теоретические положения физических процессов в оптических системах в экспериментальных исследованиях; - применять оптические системы, аналоговые и цифровые системы записи и обработки сигналов и изображений в экспериментальных исследованиях; - анализировать варианты решения исследовательских задач. <p>Успешное и системное владение и применение навыков:</p> <ul style="list-style-type: none"> - сбора, обработки и анализа информации, ориентации в источниках и научной литературе, логики и терминологии научного исследования; - выбора методов решения теоретических задач, сбора, обработки, анализа и систематизации знаний о физических явлениях в области волновой и квантовой оптики, волоконной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии, оптической обработки информации, оптических методов измерения и контроля; - постановки и проведения экспериментальных исследований с использованием оптических систем, аналоговых и цифровых систем записи и обработки сигналов и изображений. 	<p>квантовых системах;</p> <ul style="list-style-type: none"> - применять теоретические положения физических процессов в оптических системах в экспериментальных исследованиях; - применять оптические системы, аналоговые и цифровые системы записи и обработки сигналов и изображений в экспериментальных исследованиях; - анализировать варианты решения исследовательских задач. <p>Фрагментарное владение и применение навыков:</p> <ul style="list-style-type: none"> - сбора, обработки и анализа информации, ориентации в источниках и научной литературе, логики и терминологии научного исследования; - выбора методов решения теоретических задач, сбора, обработки, анализа и систематизации знаний о физических явлениях в области волновой и квантовой оптики, волоконной и нелинейной оптики, оптической спектроскопии, оптической обработки информации, оптических методов измерения и контроля; - постановки и проведения экспериментальных исследований с использованием оптических систем, аналоговых и цифровых систем записи и обработки сигналов и изображений.
--	---