


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт автоматики и процессов управления  
Дальневосточного отделения Российской академии наук  
(ИАПУ ДВО РАН)


«СОГЛАСОВАНО»

Зам. директора по научно-образовательной деятельности,  
ученый секретарь, к.т.н.

  
С.Б. Змей  
«29» декабря 2021 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИАПУ ДВО РАН  
член-корреспондент РАН

  
Р.В. Ромашко  
декабря 2021 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ (РПУД)**

**Регулярные и нерегулярные оптические волноводы**

**Группа научных специальностей 1.3. – «Физические науки»,  
научная специальность «Лазерная физика»**

**Основная образовательная программа «Лазерная физика»**

**Форма подготовки (очная)**

Междисциплинарная кафедра подготовки кадров высшей квалификации (МК ПКВК)  
ИАПУ ДВО РАН

курс 2 семестр 4  
лекции 18 час. / 0,5 з.е.  
практические занятия – 18 час. / 0,5 з.е.  
лабораторные работы – нет.  
всего часов аудиторной нагрузки 36 (час.) / 1,0 з.е.  
самостоятельная работа 20 (час.) / 0,56 з.е.  
контрольные работы нет  
курсовая работа / курсовой проект не предусмотрены  
зачет 4 семестр  
экзамен \_\_\_\_\_ семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, условиям их реализации и срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий обучающихся, утвержденными приказом Министерства науки и образования и науки РФ от 20 октября 2021 № 951.

Рабочая программа обсуждена на заседании МК ПКВК ИАПУ ДВО РАН, протокол № 3 от «17» ноября 2021 г.

Заведующий кафедрой: д-р физ.- мат. наук, профессор Н.Г. Галкин  
Составитель (ли): к.ф.-м.н. А.В. Дышлюк

**Оборотная сторона титульного листа РПУД**

**I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

**II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)



## АННОТАЦИЯ

Дисциплина «Регулярные и нерегулярные оптические волноводы» предназначена для аспирантов, обучающихся по основной образовательной программе «Лазерная физика» и входит в число дисциплин по выбору вариативной части учебного плана.

При разработке рабочей программы учебной дисциплины использованы федеральные государственные требования к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по группе научных специальностей 1.3. – «Физические науки» и научной специальности 1.3.19 – «Лазерная физика» и учебный план подготовки аспирантов по научной специальности «Лазерная физика».

**Цель** Основная цель изучения дисциплины – подготовка к сдаче кандидатского минимума по лазерной физике.

### **Задачи:**

1. Способствовать освоению аспирантами основных разделов курса «Регулярные и нерегулярные оптические волноводы», необходимых для дальнейшей успешной научной деятельности.

2. Формирование компетенций, соответствующих профилю подготовки «Лазерная физика»

**Компетенции выпускника, формируемые в результате изучения дисциплины.**

Универсальные компетенции:

- 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,

Общепрофессиональные компетенции:

- ОПК-1. Способностью самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области лазерной физики с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий

Профессиональные компетенции:

- ПК-1 Способность самостоятельно ставить и решать задачи в области электродинамики и лазерной физики с применением актуальных аналитических методов и численного моделирования на базе современной компьютерной техники и специализированного программного обеспечения;

- ПК-2 Владение основными методами постановки и проведения экспериментов в области лазерной физики, фотоники и оптоэлектроники;

- ПК-3 Владение навыками разработки и создания функциональных элементов и устройств лазерной физики, фотоники и оптоэлектроники;

**Требования к уровню усвоения содержания дисциплины.**

Аспиранты должны приобрести следующие знания и умения:

-знать:

- основные методы создания регулярных и нерегулярных оптических волноводов;
- основные типы лабораторных установок (оборудования) для экспериментального исследования процессов распространения излучения по диэлектрическим световодам;



- основные методы определения физических свойств и параметров диэлектрических световодов;
- методы исследования функциональных характеристик диэлектрических световодов;
- современное состояние науки в выбранной области волоконной и волноводной оптики;
- современные телекоммуникационные технологии, базирующиеся на использовании волноводов оптического диапазона.

Уметь:

- выбирать модели, необходимые для описания с требующейся точностью процессов распространения электромагнитного излучения оптического диапазона по диэлектрическим волноводам;
- критически оценивать область применимости выбранных моделей для описания процессов распространения света по диэлектрическим волноводам;
- обосновано выбирать методы решения фундаментальных и прикладных задач, связанных с процессами распространения света по диэлектрическим волноводам;
- эффективно использовать современное лабораторное оборудование для постановки проведения экспериментов в данной области знаний;
- выбирать и применять методы определения физических параметров волноводных структур;
- выбирать и применять методы определения функциональных характеристик волноводных структур;
- рационально организовывать научную работу в области волоконной и волноводной оптики;

- эффективно представлять результаты научной работы с использованием современных мультимедийных технологий;
- готовить заявки на получение научных грантов и заключения контрактов по НИР в области волоконной и волноводной оптики.

## **СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (18 часов)**

- **Раздел I. Лучевой анализ оптических волноводов (ОВ). (4 час.)**
- **Тема 1. Потери излучения в кварце «Хвосты» УФ и ИК поглощения. Рэлеевское рассеяние. Примесное поглощение. «Окна» прозрачности.**
- **Тема 2. Симметричный планарный волновод (СПВ). Закон Снеллиуса применительно к СПВ. Критический угол. Классификация лучей: направляемые и вытекающие.**
- **Тема 3. Волоконные световоды со ступенчатым профилем показателя преломления. Устройство волоконных световодов (ВС) со ступенчатым профилем показателя преломления. Особенности закона Снеллиуса применительно к ВС. Классификация лучей: направляемые и вытекающие, меридианальные и косые, туннелирующие лучи.**
- **Тема 4. Дисперсия в волоконных световодах. Время распространения луча в ВС. Уширение импульсов. Лучевая дисперсия. Слабонаправляющие ВС.**
- **Тема 5. Градиентные ВС. Лучи в градиентных ВС. Оптимальный профиль показателя преломления.**
- **Тема 6. Волновые параметры направляемых лучей. Постоянная распространения. Поперечные фазовые параметры. Приведенная частота волновода.**



- **Тема 7. Фазовая и групповая скорость распространения луча.** Материальная и волноводная дисперсия в одномодовых световодах. Область «нулевой» материальной дисперсии в кварце. ВС с «нулевой», «положительной» и «отрицательной» материальной дисперсией. ВС со «смещенной» дисперсией.
- **Тема 8. Технология изготовления ВС. Контроль качества волоконных световодов.**
- **Раздел II. Модовый анализ регулярных ОВ (4 часа).**
- **Тема 9. Границы применимости лучевого подхода.** Физическая картина возникновения мод. Скалярное приближение для слабонаправляющих волноводов. ТЕМ и LP моды. Граничные условия.
- **Тема 10. Решение скалярного волнового уравнения для СПВ.** Решение скалярного волнового уравнения для СПВ. Четные и нечетные моды. Характеристическое уравнение и его графическое решение. Диапазон изменения фазовых параметров мод и частота отсечки ТЕМ моды. Диапазон одномодового режима. Число ТЕМ мод. Ортогональности и нормировка ТЕМ мод. Разложение направляемых волн по ТЕМ модам в СПВ. Мощность моды. Часть мощности в сердцевине.
- **Тема 11. Особенности ТЕ и ТМ мод.** Особенности ТЕ и ТМ мод. Роль поляризационных поправок
- **Тема 12. Решение скалярного волнового уравнения для ВС.** Решение скалярного волнового уравнения для ВС. Типы LP мод. Характеристическое уравнение и свойства его решений. Диапазон изменения фазовых параметров мод и частота отсечки LP моды. Диапазон одномодового режима. Аксиальная и радиальная структура LP мод - распределение поляризации и интенсивности. Основная мода ВС

Моды высокого и низкого порядков. Вырождение LP моды и количество вырожденных мод. Общее число LP мод в ВС.

- **Тема 13. Ортогональности и нормировка LP мод.** Разложение направляемых волн по LP волнам в ВС. Мощность моды. Часть мощности в сердцевине. Межмодовая интерференция и спекл-структура картины межмодовой интерференции на выходе многомодового ВС

- **Тема 14. Гибридный характер мод реального ВС.** Особенности EH и HE мод. Поляризационные поправки к скалярным постоянным распространения для EH и HE мод. Интерференция LP мод одного порядка. О применимости приближения LP мод для описания светового поля в ВС.

- **Раздел III. Возбуждение ОВ. (5 часов)**

- **Тема 15. Возбуждение волноводов.** Поле возбуждения. Поле возбуждения в случае плоских волн.

- **Тема 16. Разложение возбуждающего поля по ТЕМ модам в СПВ.** Коэффициенты возбуждения мод. Возбуждение плоскими волнами в случае нормального падения. Типы возбуждаемых мод. Возбуждение основной моды. Возбуждение СПВ плоскими волнами в случае наклонного падения. Типы возбуждаемых мод. Оптимальный угол ввода. Возбуждение основной моды.

- **Тема 17. Разложение возбуждающего поля по LP модам в ВС.** Коэффициенты возбуждения мод. Возбуждение плоскими волнами в случае нормального падения. Типы возбуждаемых мод. Возбуждение основной моды.

- **Тема 18. Возбуждение ВС плоскими волнами в случае наклонного падения.** Типы возбуждаемых мод. Оптимальный угол ввода. Возбуждение основной моды.



- **Раздел IV. Модовый анализ нерегулярных ОВ. (5 час.)**
- **Тема 19. Возмущения ОВ.** Возмущения как отклонения от идеального профиля показателя преломления
- **Тема 20. Нерегулярные ОВ.** Модовый анализ для нерегулярных ОВ. Уравнение связанных мод. Коэффициенты связи.
- **Тема 21. Условия сильной и слабой связи мод.** Условия сильной и слабой связи мод. Сравнение с лучевым подходом
- **Тема 22. Макроизгиб ВС.** Эквивалентный профиль показателя преломления изогнутого ВС. Коэффициенты связи и связанные моды изогнутого ВС.
- **Тема 23. Метод итераций для решения уравнение связанных мод в случае слабой связи.**
- **Тема 24. Микроизгибы.** Микроизгибы. Коэффициенты связи и связанные моды ВС в случае микроизгибов
- **Тема 25. Сильная связь мод.** Сильная связь мод. Решение уравнения связанных мод в случае сильной связи.

## **СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (18 часов)**

### **ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЯ**

**Задание 1. Лучевой анализ оптических волноводов (ОВ) (3 час.).** Расчет лучевых траекторий и времени распространения лучей в ступенчатых и градиентных световодах.

**Задание 2. Модовый анализ регулярных ОВ (3 час.).** Решение скалярного волнового уравнения для симметричного планарного и волоконного световодов.

**Задание 3. Возбуждение ОВ (4 час.).** Расчет коэффициентов возбуждения мод симметричного планарного и волоконного световодов.

**Задание 4. Модовый анализ нерегулярных ОВ (4 час.).** Расчет поправок для параметров мод нерегулярных ОВ. Решение уравнения связанных мод в случае слабой и сильной связи.

**Задание 5. Применения ОВ (4 час.).** Расчет параметров волоконно-оптических датчиков на основе амплитудной, поляризационной, фазовой и спектральной модуляции оптического излучения.

### **САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА АСПИРАНТОВ (20 ЧАСОВ)**

1. Знакомство с научными периодическими изданиями по методам анализа процессов распространения оптического излучения по регулярным и нерегулярным волноводам.
2. Овладение методиками применения оптических измерительных приборов для контроля параметров волоконно-оптических линий связи.
3. Изучение метода оптической временной рефлектометрии.
4. Изучение принципа работы и практических применений волоконно-оптических измерительных преобразователей на основе волоконных брэгговских решеток.
5. Изучение технологий производства волоконных световодов различных типов и волоконно-оптических кабелей.
6. Изучение номенклатуры телекоммуникационного оборудования для волоконно-оптических систем передачи информации и волоконно-оптических сетей доступа.



## КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА

### Вопросы к дифференцированному зачету:

1. Потери излучения в кварце. «Хвосты» УФ и ИК поглощения. Релеевское рассеяние. Примесное поглощение. «Окна» прозрачности.
2. Симметричный планарный волновод (СПВ). Закон Снеллиуса применительно к СПВ. Критический угол. Классификация лучей: направляемые и вытекающие.
3. Устройство ВС со ступенчатым профилем показателя преломления. Особенности закона Снеллиуса применительно к ВС. Классификация лучей: направляемые и вытекающие, меридианальные и косые, туннелирующие лучи.
4. Время распространения луча в ВС. Уширение импульсов. Лучевая дисперсия. Слабонаправляющие ВС.
5. Градиентные ВС. Лучи в градиентных ВС. Оптимальный профиль показателя преломления.
6. Волновые параметры направляемых лучей. Постоянная распространения. Поперечные фазовые параметры. Приведенная частота волновода.
7. Фазовая и групповая скорость распространения луча. Материальная и волноводная дисперсия в одномодовых световодах. Область «нулевой» материальной дисперсии в кварце. ВС с «нулевой», «положительной» и «отрицательной» материальной дисперсией. ВС со «смещенной» дисперсией.
8. Технология изготовления ВС. Контроль качества волоконных световодов.
9. Модовый анализ регулярных ВС.

10. Границы применимости лучевого подхода. Физическая картина возникновения мод.
11. Скалярное приближение для слабонаправляющих волноводов. ТЕМ и LP моды. Граничные условия.
12. Решение скалярного волнового уравнения для СПВ. Четные и нечетные моды. Характеристическое уравнение и его графическое решение. Диапазон изменения фазовых параметров мод и частота отсечки ТЕМ моды. Диапазон одномодового режима. Число ТЕМ мод.
13. Ортогональности и нормировка ТЕМ мод. Разложение направляемых волн по ТЕМ модам в СПВ. Мощность моды. Часть мощности в сердцевине.
14. Решение скалярного волнового уравнения для ВС. Типы LP мод. Характеристическое уравнение и свойства его решений. Диапазон изменения фазовых параметров мод и частота отсечки LP моды. Диапазон одномодового режима.
15. Аксиальная и радиальная структура LP мод - распределение поляризации и интенсивности. Основная мода ВС. Моды высокого и низкого порядков. Вырождение LP моды и количество вырожденных мод. Общее число LP мод в ВС.
16. Ортогональности и нормировка LP мод. Разложение направляемых волн по LP волнам в ВС. Мощность моды. Часть мощности в сердцевине. Межмодовая интерференция и спекл-структура картины межмодовой интерференции на выходе многомодового ВС.
17. Гибридный характер мод реального ВС. Особенности EH и HE мод. Поляризационные поправки к скалярным постоянным распространения для EH и HE мод. Интерференция LP мод.



одного порядка. О применимости приближения LP мод для описания светового поля в ВС.

18. Возмущения ВС. Возмущения как отклонения от идеального профиля показателя преломления (ППП). ППП при наличии неоднородностей, изменении радиуса сердцевины и изгибах ВС.
19. Поправка к постоянной распространения направляемых мод в возмущенном ВС.
20. Теория связанных мод. Коэффициенты связи при различных типах неоднородности ВС.
21. Условия сильной и слабой связи мод. Сравнение с лучевым подходом
22. Макроизгиб ВС. Эквивалентный профиль показателя преломления изогнутого ВС. Коэффициенты связи и связанные моды изогнутого ВС.
23. Метод итераций для решения уравнение связанных мод в случае слабой связи
24. Сильная связь мод. Решение уравнения связанных мод в случае сильной связи.

## **УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Основная литература**

1. Оптические волноводы: [учебное пособие] /О. Б. Витрик.- Владивосток: Изд-во Дальневосточного технического университета, 2008. - 110 с.
2. Гончаренко, А.М. Основы теории оптических волноводов / А.М.Гончаренко, В.А.Карпенко. - М: МВТУ им. Баумана, 2004.– 542 с.

3. Гончаренко А.М. Основы теории оптических волноводов [Электронный ресурс]: монография/ Гончаренко А.М., Карпенко В.А., Гончаренко И.А.— Электрон. текстовые данные.— Минск: Белорусская наука, 2009.— 296 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/10062>. — ЭБС «IPRbooks»

4. Падусова Е.В. Расчёт диэлектрических волноводов и объёмных резонаторов [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Падусова Е.В., Шарангович С.Н.— Электрон. текстовые данные.— Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2009.— 116 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/13866>. — ЭБС «IPRbooks»

5. Куш Г.Г. Приборы и устройства оптического и СВЧ диапазонов [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Куш Г.Г., Соколова Ж.М., Шангина Л.И.— Электрон. текстовые данные.— Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012.— 414 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/14020>. — ЭБС «IPRbooks»

#### **Дополнительная литература**

1. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э Удда.— М.: Техносфера, 2008.— 520 с.

2. Дмитриев, А. Л. Оптические системы передачи информации : [учебное пособие] / А. Л. Дмитриев. – СПб: СПбГУИТМО, 2007. – 96 с.

3. Гуртов В.А. Оптоэлектроника и волоконная оптика: Учебное пособие. - Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. - 239 с. <http://window.edu.ru/resource/066/65066>

4. Никоноров Н.В., Сидоров А.И. Материалы и технологии волоконной оптики: оптическое волокно для систем передачи



информации: Учебное пособие. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. - 95 с.

<http://window.edu.ru/resource/393/67393>

5. Никоноров Н.В., Сидоров А.И. Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна: Учебное пособие.

- СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. - 130 с.

<http://window.edu.ru/resource/394/67394>

6. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 272 с.