

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физико-технический факультет
Кафедра оптоэлектроники



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и инновациям

М.В. Шарафан

2021г.

Рабочая учебная программа по дисциплине

Б1.В.ДВ.2.2. ВОЛНОВОДНАЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

Направление подготовки
03.06.01 Физика и астрономия

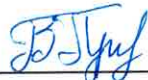
Профиль программы
01.04.05 Оптика

Квалификация выпускника: **Исследователь. Преподаватель-Исследователь**


Форма обучения
очная, заочная

Краснодар - 2021

Рабочая программа дисциплины «Волноводная оптоэлектроника»
составлена в соответствии с Федеральным государственным образовательным стан-
дартом высшего образования по программе 03.06.01 «Физика и астрономия»
(уровень подготовки кадров высшей квалификации) профиль 01.04.05 «Опти-
ка

Программу составил  Прохоров В.П., канд. физ.-мат. наук, доцент

Заведующий кафедрой (разработчика) Яковенко Н.А., д-р техн. наук, профессор

Рабочая программа обсуждена на  заседании кафедры (выпускающей)
оптоэлектроники
«07» апреля 2021 г. протокол № 8

Заведующий кафедрой (выпускающей) Яковенко Н.А., д-р техн. наук, профессор

Утверждена на заседании учебно-методической комиссии факультета
«16» апреля 2021 г. протокол № 13

Председатель УМК факультета Богатов Н.М., д-р физ.-мат. наук, профессор



Зав.отделом аспирантуры  Н.Ю. Звягинцева

1 Цели и задачи изучения дисциплины

1.1 Цель дисциплины

Целью освоения дисциплины – обеспечение подготовки аспирантов в области элементной базы систем оптической связи.

Дисциплина «Волноводная оптоэлектроника» входит в блок естественно-научных дисциплин, предназначенных для изучения теоретических основ волноводной оптоэлектроники, включающих в себя основные принципы и алгоритмы проектирования различных волноводных структур и функциональных элементов обработки информационных сигналов в интегральных оптических схемах. Особое внимание при этом уделяется изучению современных методов теоретического анализа базовых устройств интегральной и волоконной оптики а также рассмотрению фундаментальных физических принципов, лежащих в основе функционирования подобных систем. Актуальность дисциплины «Волноводная оптоэлектроника» обусловлена применением знаний, умений и навыков, полученных в процессе ее изучения, для изучения дисциплин из других блоков и успешного освоения специальности в целом.

1.2 Задачи дисциплины

Основные задачи освоения дисциплины:

- изучение волноводных систем, а также компонентов оптоэлектроники;
- численное моделирование и расчет основных параметров как планарных и канальных интегрально-оптических волноводов, так и волноводных компонентов интегрально-оптических схем.

В результате изучения настоящей дисциплины аспиранты получают знания, имеющие не только самостоятельное значение, но и являющиеся фундаментом для изучения ряда последующих специальных дисциплин и практической научно-исследовательской работы аспирантов по профилю «Оптика».

1.3 Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина Б1.В.ДВ.2.2 «Волноводная оптоэлектроника» входит в блок Б1 Дисциплины (модули), Вариативную часть Б1.В, модуль Б1.В.ДВ Дисциплины по выбору, учебного плана.

Дисциплина логически и содержательно-методически связана с дисциплинами модулей Б1.В.ОД.1 «Оптика» и Б1.В.ОД.2 «Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом». Для освоения данной дисциплины необходимо владеть методами математического анализа, аналитической геометрии, линейной алгебры, решением алгебраических, дифференциальных и интегральных уравнений; теории функций комплексного переменного, теории вероятностей и математической статистики; знать основные физические законы; уметь применять математические методы и физические законы для решения практических задач.

В результате изучения настоящей дисциплины студенты должны получить знания, имеющие не только самостоятельное значение, но и обеспечивающие базовую

подготовку для усвоения дисциплин базовой и вариативной частей блока 1 «Дисциплины (модули)» учебного плана.

1.4 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Изучение данной учебной дисциплины направлено на формирование у обучающихся следующих компетенций: УК-5, ОПК-1, ПК-1.

| № п.п. | Индекс компетенции | Содержание компетенции (или её части) | В результате изучения учебной дисциплины обучающиеся должны | | |
|--------|--------------------|---|---|---|---|
| | | | знать | уметь | владеть |
| 1. | УК-5 | Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития. | – современные способы использования информационно-коммуникационных технологий в выбранной сфере деятельности (Шифр: 3 (ОПК-1) – 1); | – осуществлять личностный выбор в различных профессиональных и морально-ценностных ситуациях, оценивать последствия принятого решения и нести за него ответственность перед собой и обществом (Шифр: У (УК-5) – 2); | – приемами и технологиями целеполагания, целереализации и оценки результатов деятельности по решению профессиональных задач (Шифр: В (УК-5) – 1); |
| 2. | ОПК-1 | Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий. | – теорию и концепцию распространения света и его взаимодействие с веществом (Шифр: 3 (ПК-1) – 1); | – выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетные теоретические методы исследования (Шифр: У (ОПК-1) – 1); | – навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных) и критического анализа информации по тематике проводимых исследова- |
| 3. | ПК-1 | Способность использовать теорию, концепцию и принципы в предметной области исследования природы света и его распространения и взаимодействия с веществом, а так- | – основы технологий передачи и обработки информации и энергии (Шифр: 3 (ПК-1) – 2). | – выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетные теоретические методы исследования (Шифр: У (ОПК-1) – 1); | – приемами и технологиями целеполагания, целереализации и оценки результатов деятельности по решению профессиональных задач (Шифр: В (УК-5) – 1); |

| № п.п. | Индекс компетенции | Содержание компетенции (или её части) | В результате изучения учебной дисциплины обучающиеся должны | | |
|--------|--------------------|---|---|--|--|
| | | | знать | уметь | владеть |
| | | же основы технологий передачи информации и энергии, диагностики объектов различной природы. | | <ul style="list-style-type: none"> – применять принципы и методы исследования взаимодействия света с веществом (Шифр: У (ПК-1) – 1); – применять принципы и методы диагностики различных оптических систем (Шифр: У (ПК-1) – 2). | <ul style="list-style-type: none"> ний (Шифр: В (ОПК-1) – 1); – навыками планирования научно-исследования, анализа полученных результатов и формулировки выводов (Шифр: В (ОПК-1) – 2); – методами диагностики, исследования и конструирования различных оптических систем (Шифр: В (ПК-1) – 1) |

2. Структура и содержание дисциплины

2.1 Распределение трудоёмкости дисциплины по видам работ

Общая трудоёмкость дисциплины составляет 3 зач.ед. (108 часов), их распределение по видам работ представлено в таблице (для студентов ОФО).

| Вид учебной работы | Всего часов | Семестры | | | |
|-----------------------------------|-------------|----------|--|--|--|
| | | 3 | | | |
| Аудиторные занятия (всего) | 44 | 44 | | | |

| | | | | | |
|--|-----------|-----------|--|--|--|
| В том числе: | | | | | |
| Занятия лекционного типа | 8 | 8 | | | |
| Занятия семинарского типа (семинары, практические занятия, коллоквиумы и иные аналогичные занятия) | 18 | 18 | | | |
| Занятия лабораторного типа (практикумы, лабораторные работы) | 18 | 18 | | | |
| Контролируемая самостоятельная работа | – | – | | | |
| Самостоятельная работа (всего) | 64 | 64 | | | |
| В том числе: | | | | | |
| Курсовая работа | – | – | | | |
| Контроль | – | – | | | |
| Вид промежуточной аттестации (зачет, экзамен) | зачет | зачет | | | |
| Общая трудоемкость час | 108 | 108 | | | |
| ед. | зач. | зач. | | | |
| | 3 | 3 | | | |

2.2 Структура дисциплины:

Распределение видов учебной работы и их трудоемкости по разделам дисциплины.

Разделы дисциплины, изучаемые в 3 семестре (для студентов ОФО):

| № раздела | Наименование разделов | Количество часов | | | | |
|-----------|---|------------------|-------------------|----|----|------------------------|
| | | Всего | Аудиторная работа | | | Самостоятельная работа |
| | | | Л | ПЗ | ЛР | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1. | Планарные, канальные и полосковые интегрально-оптические волноводы | 16 | 2 | 4 | | 10 |
| 2. | Проектирование технологических условий изготовления одномодовых интегрально-оптических волноводов | 30 | 4 | 4 | 10 | 12 |
| 3. | Элементы волноводной связи для ввода и вывода излучения | 8 | | 2 | | 6 |

| № раздела | Наименование разделов | Количество часов | | | | |
|---------------|---|------------------|-------------------|----|----|------------------------|
| | | Всего | Аудиторная работа | | | Самостоятельная работа |
| | | | Л | ПЗ | ЛР | |
| 4. | Методы расчета элементов волноводного тракта интегрально-оптических схем на основе трехмерных оптических волноводов | 26 | 2 | 4 | 8 | 12 |
| 5. | Активные интегрально-оптические элементы | 14 | | 2 | | 12 |
| 6. | Интегрально-оптические устройства и оптические интегральные схемы для систем передачи и обработки информации | 14 | | 2 | | 12 |
| <i>Всего:</i> | | 108 | 8 | 18 | 18 | 64 |

2.3 Содержание разделов дисциплины:

2.3.1 Занятия лекционного типа

| № | Наименование раздела | Содержание раздела | Форма текущего контроля |
|----|--|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1. | Планарные, канальные и полосковые интегрально-оптические волноводы | <p>Планарные диэлектрические волноводы (волноводные моды, распределения полей, дисперсионные соотношения и групповые скорости). Классификация и общие свойства оптических волноводов. ТЕ- и ТМ-моды в асимметричном планарном оптическом волноводе. Эффективный показатель преломления волноводных мод, эффективная глубина градиентного волновода, поляризация мод. Волноводные моды планарных и канальных градиентных волноводов. Нормированные переменные.</p> <p>Двумерные волноводы. Методы расчета. Метод эффективного показателя преломления. Канальные волноводы с одномерной и двумерной диффузией.</p> | <p>Ответы на контрольные вопросы (КВ) / выполнение практических заданий (ПЗ)</p> |
| 2. | Проектирование технологических условий изготовления одно- | <p>Методы реконструкции градиентного профиля показателя преломления интегрально-оптических волноводов. Использование численных методов для</p> | <p>КВ / ПЗ</p> |

| | | | |
|----|---|--|---------|
| | модовых интегрально-оптических волноводов | определения коэффициента диффузии и максимального приращения показателя преломления на поверхности волновода. Численное моделирование полуэмпирического соотношения связи между поверхностным значением показателя преломления волновода и концентрацией ионов диффузанта в солевом расплаве. Численное моделирование полуэмпирического соотношения связи между эффективной глубиной диффузии волновода и температурой диффузии. Численное моделирование полуэмпирического уравнения связи между концентрацией ионов диффузанта, временем диффузионного процесса и модовым составом получаемого волновода. | |
| 3. | Элементы волноводной связи для ввода и вывода излучения | <p>Согласование оптических волноводов, расположенных на одной и различных подложках. Торцевое возбуждение. Призмённые и решеточные элементы связи. Суживающиеся волноводы.</p> <p>Соединения трехмерных оптических волноводов на общей подложке. Принцип направленной связи. Метод ортогональных волн для расчета эффективности направленной связи.</p> <p>Методы согласования оптических волноводов и волоконных световодов. Расчет эффективности согласования одномодовых и многомодовых волноводных структур. Оптические согласующие элементы.</p> <p>Волноводные направленные ответвители на основе канальных диффузионных волноводов. Моды волноводов и теория связанных мод. Основные уравнения, характеризующие направленную связь в направленных ответвителях оптической мощности.</p> | КВ / ПЗ |
| 4. | Методы расчета элементов волноводного тракта интегрально- | Элементная база интегрально-оптических схем. Классификация основных пассивных волноводных элементов. Основные параметры и харак- | КВ / ПЗ |

| | | | |
|----|---|--|----------------|
| | <p>оптических схем на основе трехмерных оптических волноводов</p> | <p>характеристики элементов волноводного тракта. Вносимые потери и методы их численного расчета. Формализм связанных мод и его использование.</p> <p>Элементы изгиба канальных диффузионных волноводов. Влияние радиуса кривизны и параметров волноводов.</p> <p>Волноводные переходы и соединения. Рупорообразные волноводные структуры. Условия адиабатического перехода направляемой мощности. Приближенные методы расчета волноводных переходов и рупоров.</p> <p>Разветвления трехмерных оптических волноводов. Двухканальные делители мощности на основе канальных диффузионных волноводов. Методы расчета вносимых потерь в разветвителях Y-типа. Влияние параметров волноводов.</p> <p>Оптические направленные ответвители мощности. Метод связанных мод для расчета эффективности направленной связи канальных ответвителей.</p> <p>Пересечения трехмерных оптических волноводов. Методы расчета вносимых потерь и эффективности передачи мощности в волноводных пересечениях X- и Y-типов. Влияние угла пересечения и параметров волноводов.</p> | |
| 5. | <p>Активные интегрально-оптические элементы</p> | <p>Волноводные устройства, получаемые диффузией титана в подложки ниобата лития, как активная элементная база интегрально-оптических схем различного функционального назначения. Основные рабочие характеристики оптических волноводных модуляторов и переключателей. Электрооптический эффект. Одноволноводные электрооптические модуляторы. Двухканальные волноводные электрооптические модуляторы. Электрооптические модуляторы типа Маха-Цендера. Электрооптические модуляторы отражающего и переключающего типа. Электрооптические переключатели на связанных оп-</p> | <p>КВ / ПЗ</p> |

| | | | |
|----|--|--|---------|
| | | тических волноводах. Электрооптические модуляторы бегущей волны. Теория электрооптических волноводных модуляторов. Применение ЭВМ для численного расчета основных характеристик волноводных модуляторов и переключателей. | |
| 6. | Интегрально-оптические устройства и оптические интегральные схемы для систем передачи и обработки информации | Виды и основные классы оптических интегральных схем для обработки информации. Принципы и методы оптической волноводной обработки информации. Коммутирующие оптические интегральные схемы. Примеры интегрально-оптических схем на $Ti:LiNbO_3$. Возможности и ограничения интегральной оптики в микроэлектронике. Проблемы и перспективы развития оптических интегральных схем для обработки информации. | КВ / ПЗ |

2.3.2 Занятия семинарского типа

| № | Наименование раздела | Содержание раздела | Форма текущего контроля |
|----|--|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1. | Планарные, канальные и полосковые интегрально-оптические волноводы | <p>Планарные диэлектрические волноводы (волноводные моды, распределения полей, дисперсионные соотношения и групповые скорости). Классификация и общие свойства оптических волноводов. ТЕ- и ТМ-моды в асимметричном планарном оптическом волноводе. Эффективный показатель преломления волноводных мод, эффективная глубина градиентного волновода, поляризация мод. Волноводные моды планарных и канальных градиентных волноводов. Нормированные переменные.</p> <p>Двумерные волноводы. Методы расчета. Метод эффективного показателя преломления. Канальные волноводы с одномерной и двумерной диффузией.</p> | <p>Ответы на контрольные вопросы (КВ) / выполнение практических заданий (ПЗ)</p> |
| 2. | Проектирование технологических условий изготовления одно- | <p>Методы реконструкции градиентного профиля показателя преломления интегрально-оптических волноводов. Использование численных методов</p> | КВ / ПЗ |

| | | | |
|----|---|--|---------|
| | модовых интегрально-оптических волноводов | для определения коэффициента диффузии и максимального приращения показателя преломления на поверхности волновода. Численное моделирование полуэмпирического соотношения связи между поверхностным значением показателя преломления волновода и концентрацией ионов диффузанта в солевом расплаве. Численное моделирование полуэмпирического соотношения связи между эффективной глубиной диффузии волновода и температурой диффузии. Численное моделирование полуэмпирического уравнения связи между концентрацией ионов диффузанта, временем диффузионного процесса и модовым составом получаемого волновода. | |
| 3. | Элементы волноводной связи для ввода и вывода излучения | <p>Согласование оптических волноводов, расположенных на одной и различных подложках. Торцевое возбуждение. Призмённые и решеточные элементы связи. Суживающиеся волноводы.</p> <p>Соединения трехмерных оптических волноводов на общей подложке. Принцип направленной связи. Метод ортогональных волн для расчета эффективности направленной связи.</p> <p>Методы согласования оптических волноводов и волоконных световодов. Расчет эффективности согласования одномодовых и многомодовых волноводных структур. Оптические согласующие элементы.</p> <p>Волноводные направленные ответвители на основе канальных диффузионных волноводов. Моды волноводов и теория связанных мод. Основные уравнения, характеризующие направленную связь в направленных ответвителях оптической мощности.</p> | КВ / ПЗ |
| 4. | Методы расчета элементов волноводного тракта интегрально- | Элементная база интегрально-оптических схем. Классификация основных пассивных волноводных элементов. Основные параметры и харак- | КВ / ПЗ |

| | | | |
|----|---|--|---------|
| | <p>оптических схем на основе трехмерных оптических волноводов</p> | <p>характеристики элементов волноводного тракта. Вносимые потери и методы их численного расчета. Формализм связанных мод и его использование.</p> <p>Элементы изгиба канальных диффузионных волноводов. Влияние радиуса кривизны и параметров волноводов.</p> <p>Волноводные переходы и соединения. Рупорообразные волноводные структуры. Условия адиабатического перехода направляемой мощности. Приближенные методы расчета волноводных переходов и рупоров.</p> <p>Разветвления трехмерных оптических волноводов. Двухканальные делители мощности на основе канальных диффузионных волноводов. Методы расчета вносимых потерь в разветвителях Y-типа. Влияние параметров волноводов.</p> <p>Оптические направленные ответвители мощности. Метод связанных мод для расчета эффективности направленной связи канальных ответвителей.</p> <p>Пересечения трехмерных оптических волноводов. Методы расчета вносимых потерь и эффективности передачи мощности в волноводных пересечениях X- и Y-типов. Влияние угла пересечения и параметров волноводов.</p> | |
| 5. | Активные интегрально-оптические элементы | <p>Волноводные устройства, получаемые диффузией титана в подложки ниобата лития, как активная элементная база интегрально-оптических схем различного функционального назначения. Основные рабочие характеристики оптических волноводных модуляторов и переключателей. Электрооптический эффект. Одноволноводные электрооптические модуляторы. Двухканальные волноводные электрооптические модуляторы. Электрооптические модуляторы типа Маха-Цендера. Электрооптические модуляторы отражающего и переключающего типа. Электрооптические переключатели на связанных оп-</p> | КВ / ПЗ |

| | | | |
|----|--|--|---------|
| | | тических волноводах. Электрооптические модуляторы бегущей волны. Теория электрооптических волноводных модуляторов. Применение ЭВМ для численного расчета основных характеристик волноводных модуляторов и переключателей. | |
| 6. | Интегрально-оптические устройства и оптические интегральные схемы для систем передачи и обработки информации | Виды и основные классы оптических интегральных схем для обработки информации. Принципы и методы оптической волноводной обработки информации. Коммутирующие оптические интегральные схемы. Примеры интегрально-оптических схем на $Ti:LiNbO_3$. Возможности и ограничения интегральной оптики в микроэлектронике. Проблемы и перспективы развития оптических интегральных схем для обработки информации. | КВ / ПЗ |

2.3.3 Лабораторные занятия

| № | Наименование раздела | Содержание раздела | Форма текущего контроля |
|----|--|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 2. | Проектирование технологических условий изготовления одно-модовых интегрально-оптических волноводов | Методы реконструкции градиентного профиля показателя преломления интегрально-оптических волноводов. Использование численных методов для определения коэффициента диффузии и максимального приращения показателя преломления на поверхности волновода. Численное моделирование полуэмпирического соотношения связи между поверхностным значением показателя преломления волновода и концентрацией ионов диффузанта в солевом расплаве. Численное моделирование полуэмпирического соотношения связи между эффективной глубиной диффузии волновода и температурой диффузии. Численное моделирование полуэмпирического уравнения связи между концентрацией ионов диффузанта, временем диффузионного процесса и модовым составом получаемого | Ответы на контрольные вопросы (КВ) / выполнение практических заданий (ПЗ) / отчет и защита выполненной лабораторной работы (ЛР) |

| | | | |
|----|---|--|--------------|
| | | волновода. | |
| 4. | Методы расчета элементов волноводного тракта интегрально-оптических схем на основе трехмерных оптических волноводов | <p>Элементная база интегрально-оптических схем. Классификация основных пассивных волноводных элементов. Основные параметры и характеристики элементов волноводного тракта. Вносимые потери и методы их численного расчета. Формализм связанных мод и его использование.</p> <p>Элементы изгиба канальных диффузионных волноводов. Влияние радиуса кривизны и параметров волноводов.</p> <p>Волноводные переходы и соединения. Рупорообразные волноводные структуры. Условия адиабатического перехода направляемой мощности. Приближенные методы расчета волноводных переходов и рупоров.</p> <p>Разветвления трехмерных оптических волноводов. Двухканальные делители мощности на основе канальных диффузионных волноводов. Методы расчета вносимых потерь в разветвителях Y-типа. Влияние параметров волноводов.</p> <p>Оптические направленные ответвители мощности. Метод связанных мод для расчета эффективности направленной связи канальных ответвителей.</p> <p>Пересечения трехмерных оптических волноводов. Методы расчета вносимых потерь и эффективности передачи мощности в волноводных пересечениях X- и Y-типов. Влияние угла пересечения и параметров волноводов.</p> | КВ / ПЗ / ЛР |

Лабораторные работы

| № п/п | № раздела дисциплины | Наименование лабораторных работ | Кол-во часов |
|-------|----------------------|--|--------------|
| 1 | 2 | Численное моделирование профиля показателя преломления планарных градиентных волноводов. | 4 |
| 2 | 2 | Численная реконструкция эффективной глубины | 4 |

| | | | |
|--------|---|--|----|
| | | и максимального приращения показателя преломления ионообменных волноводов в стеклянных подложках. | |
| 3 | 4 | Численный расчет вносимых потерь в интегрально-оптическом разветвителе Y-типа на основе канальных диффузионных волноводов с градиентным профилем. | 4 |
| 4 | 4 | Численный расчет длины и эффективности связи в интегрально-оптических направленных ответвителях мощности на основе канальных градиентных волноводов. | 3 |
| 5 | 4 | Численный расчет излучательных потерь в элементах волноводного изгиба на основе градиентных канальных волноводов. | 3 |
| Итого: | | | 18 |

Лабораторные работы выполняются в компьютерном классе в рамках системы компьютерной математики MATHCAD с использованием встроенных в эту систему средств программирования и графической визуализации результатов численных расчетов.

В результате выполнения лабораторных работ у аспирантов формируются и оцениваются требуемые ФГОС и ООП по программе 03.06.01 «Физика и астрономия» (уровень подготовки кадров высшей квалификации), профиль: 01.04.05 «Оптика» компетенции: УК-5, ОПК-1, ПК-1.

Лабораторная работа № 1.

Численное моделирование градиентного профиля показателя преломления оптических волноводов.

Цель работы:

- изучить методы численного моделирования градиентного профиля показателя преломления ионообменных оптических волноводов;
- изучить методику теоретического расчета реконструкции градиентного профиля показателя преломления ионообменных оптических волноводов с помощью модельной функции зависимости эффективных показателей преломления волноводных мод от порядка моды;
- освоить основные численные методы интерполяции экспериментальных данных (в особенности интерполирование полиномами Ньютона);
- написать и отладить программу численного расчета точек поворота волноводных мод в рамках системы компьютерной математики MATHCAD;
- написать и отладить программу численного расчета аппроксимационной зависимости экспериментальных значений эффективных показателей преломления волноводных мод от точек поворота в рамках системы компьютерной математики MATHCAD;
- написать и отладить программу численного моделирования градиентного профиля показателя преломления ионообменных оптических волноводов на основе метода нелинейной регрессии в рамках системы компьютерной математики MATHCAD;

MATNCAD;

В процессе выполнения работы студент, руководствуясь методическими указаниями к выполнению данной работы:

- определяет основные расчетные соотношения;
- разрабатывает алгоритм численного расчета точек поворота волноводных мод;
- разрабатывает алгоритм численного расчета аппроксимационной зависимости экспериментальных значений эффективных показателей преломления волноводных мод от точек поворота;
- разрабатывает алгоритм численного моделирования градиентного профиля показателя преломления ионообменных оптических волноводов на основе метода нелинейной регрессии;
- составляет соответствующую программу численного расчета в инженерно-компьютерной системе MATNCAD;
- осуществляет отладку программы, используя типовые наборы входных данных для градиентных ионообменных оптических волноводов, приведенные в задании к лабораторной работе;
- предоставляет завершенный программный код в формате компьютерной системы MATNCAD (файл *.xmcd) преподавателю для проверки и отвечает на вопросы преподавателя для получения зачета за выполненную работу.

Лабораторная работа № 2.

Численная реконструкция эффективной глубины и максимального приращения показателя преломления ионо-обменных волноводов в стеклянных подложках.

Цель работы:

- изучить методику численной реконструкции эффективной глубины и максимального приращения показателя преломления оптических волноводов с градиентным профилем показателя преломления;
- освоить наиболее эффективные численные методы нелинейной оптимизации для решения поставленной задачи (в особенности метод Левенберга–Маркардта);
- написать и отладить программу численной реконструкции эффективной глубины и максимального приращения показателя преломления оптических волноводов с градиентным профилем показателя преломления в рамках системы компьютерной математики MATNCAD.

В процессе выполнения работы студент, руководствуясь методическими указаниями к выполнению данной работы:

- определяет основные расчетные соотношения;
- разрабатывает отмеченные выше алгоритмы численного расчета;
- составляет соответствующую программу численного расчета в инженерно-компьютерной системе MATNCAD;
- осуществляет отладку программы, используя типовые наборы входных данных для градиентных ионообменных оптических волноводов, приведенные в задании к лабораторной работе;
- использует наиболее эффективные методы графической визуализации получаемых в результате численных расчетов зависимостей;

– предоставляет завершенный программный код в формате компьютерной системы MATHCAD (файл *.xmcd) преподавателю для проверки и отвечает на вопросы преподавателя для получения зачета за выполненную работу.

Лабораторная работа № 3.

Численный расчет вносимых потерь в интегрально-оптическом разветвителе Y-типа на основе канальных диффузионных волноводов с градиентным профилем.

Лабораторная работа № 4.

Численный расчет длины и эффективности связи в интегрально-оптических направленных ответвителях мощности на основе канальных градиентных волноводов.

Лабораторная работа № 5.

Численный расчет излучательных потерь в элементах волноводного изгиба на основе градиентных канальных волноводов.

2.3.4 Примерная тематика курсовых работ (проектов)

Согласно учебному плану курсовые работы (проекты) по данной дисциплине не предусмотрены.

2.4 Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)

| № | Наименование раздела | Перечень учебно-методического обеспечения дисциплины по выполнению самостоятельной работы |
|---|----------------------|---|
| 1 | 2 | 3 |

| № | Наименование раздела | Перечень учебно-методического обеспечения дисциплины по выполнению самостоятельной работы |
|---|---|--|
| 1 | 1 ÷ 6 см. таблицу пункта 2.3.1 Занятия лекционного типа | <p>1. Ларкин А.И., Юу Ф.Т.С. Когерентная фотоника. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.</p> <p>2. Локшин Г.Р. Основы радиооптики. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009.</p> <p>3. Оптические устройства в радиотехнике / А.Ю. Гринев и др.; под ред. В.Н. Ушакова. Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Радиотехника, 2009.</p> <p>4. Оптоэлектроника. В 2 т. / О.Н. Ермаков, А.Н. Пихтин, Ю.Ю. Протасов, С.А. Тарасов; под общ. ред. И.Б. Федорова. – М.: Янус-К, 2010.</p> <p>5. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения. В 2 т. Пер с англ. В.Л.Дербова. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012.</p> |

3. Образовательные технологии

В процессе преподавания дисциплины используются следующие методы:

- лекции;
- проведение практических занятий;
- домашние задания;
- опрос;
- индивидуальные практические задания;
- контрольные работы;
- тестирование;
- публичная защита лабораторных работ;
- консультации преподавателей;

– самостоятельная работа студентов (изучение теоретического материала, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение домашних работ и индивидуальных типовых расчетов, подготовка к опросу, тестированию и зачету).

Для проведения всех лекционных и практических (семинарских) занятий используются мультимедийные средства воспроизведения активного содержимого, позволяющего слушателю воспринимать особенности изучаемого материала, зачастую играющие решающую роль в понимании и восприятии, а также формировании профессиональных компетенций. Интерактивные аудиторные занятия с использованием мультимедийных систем позволяют активно и эффективно вовлекать учащихся в учебный процесс и осуществлять обратную связь. Помимо этого, становится возможным эффективное обсуждение сложных и дискуссионных вопросов и проблем.

По изучаемой дисциплине студентам предоставляется возможность открыто пользоваться (в том числе копировать на личные носители информации) подготовленными ведущим данную дисциплину преподавателем материалами в виде электронного комплекса сопровождения, включающего в себя:

- электронные конспекты лекций;
- электронные планы практических (семинарских) занятий;
- электронные варианты учебно-методических пособий для выполнения лабораторных заданий;
- списки контрольных вопросов к каждой теме изучаемого курса;
- разнообразную дополнительную литературу, относящуюся к изучаемой дисциплине в электронном виде (в различных текстовых форматах *.doc, *.rtf, *.htm, *.txt, *.pdf, *.djvu и графических форматах *.jpg, *.png, *.gif, *.tif).

Сопровождение самостоятельной работы студентов также организовано в следующих формах:

- усвоение, дополнение и вникание в разбираемые разделы дисциплины при помощи знаний получаемых по средствам изучения рекомендуемой литературы и осуществляемое путем написания реферативных работ;
- консультации, организованные для разъяснения проблемных моментов при самостоятельном изучении тех или иных аспектов разделов усваиваемой информации в дисциплине.

Основные образовательные технологии, используемые в учебном процессе:

- интерактивная лекция с мультимедийной системой с активным вовлечением студентов в учебный процесс и обратной связью;
- лекции с проблемным изложением;
- обсуждение сложных и дискуссионных вопросов и проблем и разрешение проблем;
- компьютерные занятия в режимах взаимодействия «преподаватель – студент», «студент – преподаватель», «студент – студент»;
- технологии смешанного обучения: дистанционные задания и упражнения, составление глоссариев терминов и определений, групповые методы Wiki, интернет-тестирование и анкетирование.

Интерактивные образовательные технологии, используемые в аудиторных занятиях:

- технология развития критического мышления;
- лекции с проблемным изложением;
- использование средств мультимедиа;
- изучение и закрепление нового материала (интерактивная лекция, работа с наглядными пособиями, видео- и аудиоматериалами, использование вопросов, Сократический диалог);
- обсуждение сложных и дискуссионных вопросов и проблем («Займи позицию (шкала мнений)», проективные техники, «Один – вдвоем – все вместе», «Смени позицию», «Дискуссия в стиле телевизионного ток-шоу», дебаты, симпозиум);
- разрешение проблем («Дерево решений», «Мозговой штурм», «Анализ казусов»);
- творческие задания;
- работа в малых группах;

- использование средств мультимедиа (компьютерные классы);
- технология компьютерного моделирования численных расчетов в инженерно-математической системе MATHCAD (или системе компьютерной математики MATLAB).

4. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

4.1 Фонд оценочных средств для проведения текущей аттестации

Контрольные вопросы по учебной программе

В процессе подготовки и ответов на контрольные вопросы формируются и оцениваются все требуемые ФГОС и ООП по программе 03.06.01 «Физика и астрономия» (уровень подготовки кадров высшей квалификации), профиль: 01.04.05 «Оптика» компетенции: УК-5, ОПК-1, ПК-1.

Ниже приводятся пример контрольных вопросов для 1-го раздела рабочей программы.

Раздел 1. Планарные, канальные и полосковые интегрально-оптические волноводы.

1. Какие типы оптических волноводов используются в интегрально-оптических устройствах?
2. По каким параметрам классифицируются оптические волноводы?
3. Какие законы оптики приводят к волноводному распространению электромагнитных волн?
4. Какие требования предъявляются к материалам интегральной оптики? Перечислите виды материалов, используемых в интегральной оптике.
5. Какие технологии используются для изготовления устройств интегральной оптики?
6. От чего зависит распределение поля в волноводной моде?
7. Какие типы мод бывают в волноводах?
8. Чем определяется количество мод волновода?
9. Где используются оптические волноводы прямоугольного и круглого сечения?
10. Каким образом можно сформировать профиль показателя преломления планарного волновода?
11. Перечислите основные методы получения волноводов и их особенности.
12. В чем заключается принцип ионного обмена? Перечислите основные преимущества метода ионного обмена.
13. Какие типы оптических волноводов используются в интегрально-оптических устройствах?
14. По каким параметрам классифицируются оптические волноводы?
15. Какие законы оптики приводят к волноводному распространению электромагнитных волн?
16. Какие требования предъявляются к материалам интегральной оптики? Пе-

речислите виды материалов, используемых в интегральной оптике.

17. Какие технологии используются для изготовления устройств интегральной оптики?

18. От чего зависит распределение поля в волноводной моде?

19. Какие типы мод бывают в волноводах?

20. Чем определяется количество мод волновода?

21. Где используются оптические волноводы прямоугольного и круглого сечения?

22. Каким образом можно сформировать профиль показателя преломления планарного волновода?

23. Перечислите основные методы получения волноводов и их особенности.

Практические задания по учебной программе

В процессе подготовки и выполнения практических заданий формируются и оцениваются все требуемые ФГОС и ООП по программе 03.06.01 «Физика и астрономия» (уровень подготовки кадров высшей квалификации), профиль: 01.04.05 «Оптика» компетенции: УК-5, ОПК-1, ПК-1.

Ниже приводятся пример практических заданий для 1-го раздела рабочей программы.

Раздел 1. Планарные, каналные и полосковые интегрально-оптические волноводы.

1. Покажите, что одна плоская ТЕМ-волна $E_x(y, z) = A \cdot \exp(-jk_y y) \cdot \exp(-j\beta z)$ не может удовлетворить граничным условиям $E_x(\pm d/2, z) = 0$ при любом z в зеркальном волноводе.

2. Покажите, что сумма двух плоских ТЕМ-волн, записанная в виде

$$E_x(y, z) = A_1 \exp(-jk_{y1} y) \exp(-j\beta_1 z) + A_2 \exp(-jk_{y2} y) \exp(-j\beta_2 z),$$

удовлетворяет граничным условиям, если $A_1 = \pm A_2$, $\beta_1 = \beta_2$ и $k_{y1} = -k_{y2} = m\pi/d$, где $m = 1, 2, \dots$.

3. Свет с длиной волны $\lambda_0 = 0,633$ мкм проходит через зеркальный волновод с расстоянием между зеркалами $d = 10$ мкм и $n = 1$. Определите число ТЕ- и ТМ-мод. Определите групповые скорости для наиболее быстрой и медленной моды. Если короткий импульс света переносится всеми модами волновода на расстояние 1 м, то насколько импульс уширится из-за различия групповых скоростей?

4. Свет, имеющий в свободном пространстве длину волны $\lambda = 0,87$ мкм, направляется тонкой плоской пленкой толщины $d = 2$ мкм с показателем преломления $n_1 = 1,6$, которую окружает среда с показателем преломления $n_2 = 1,4$.

Определите критический угол $\theta_{кр}$ и дополнительный к нему $\bar{\theta}_{кр}$, числовую апертуру NA и максимальный угол приема для света, падающего из воздуха ($n = 1$). Определите число ТЕ-мод. Определите угол наклона θ и групповую скорость v для ТЕ-моды с $m = 0$.

5. Повторите расчет из предыдущей задачи, считая, что пленка находится в воздухе ($n = 1$). Сравните результаты.

6. Поперечное распределение $u_m(y)$ комплексной амплитуды электрического поля ТЕ-моды в пластинчатом волноводе дается формулами (28) и (31). Выведите выражение для отношения констант пропорциональности. Постройте график ТЕ-моды с $m = 0$ для пластинчатого волновода с параметрами $n_1 = 1,48$, $n_2 = 1,46$, $d = 0,5$ мкм, $\lambda_0 = 0,85$ мкм и определите фактор ограничения (процент энергии, локализованной внутри сердцевины).

7. Предполагая, что электрическое поле в симметричном диэлектрическом волноводе ведет себя гармонически внутри слоя, экспоненциально — вне слоя и в обеих средах имеет постоянную распространения β , можно записать $E_x(y, z) = u(y) \cdot \exp(-j\beta z)$, где

$$u(y) = \begin{cases} A \cos(k_y y + \varphi), & -\frac{d}{2} \leq y \leq \frac{d}{2}; \\ B \exp(-\gamma y), & y > \frac{d}{2}; \\ B \exp(\gamma y), & y < -\frac{d}{2}. \end{cases}$$

Чтобы удовлетворить уравнению Гельмгольца, необходимо

$$k_y^2 + \beta^2 = n_1^2 k_0^2; \quad -\gamma^2 + \beta^2 = n_2^2 k_0^2.$$

Используйте уравнения Максвелла, чтобы вывести выражения для $H_y(y, z)$ и $H_z(y, z)$. Покажите, что граничные условия удовлетворяются, если β , γ и k_y принимают значения β_m , γ_m и k_{ym} , выведенные в тексте, и проверьте выполнение условия самосогласования (22).

8. Какова наибольшая толщина d планарного симметричного диэлектрического волновода с показателями преломления $n_1 = 1,50$ и $n_2 = 1,46$, для которого существует только одна ТЕ-мода на длине волны $\lambda_0 = 1,3$ мкм? Каково число мод, если при той же толщине слоя заменить длину волны на $\lambda_0 = 0,85$ мкм?

9. Покажите, что условие отсечки для ТЕ-моды $m > 0$ в симметричном пластинчатом волноводе с $n_1 \approx n_2$ приближенно записывается как

$$\lambda_0^2 \approx 8n_1 \frac{\Delta n d^2}{m^2},$$

где $\Delta n = n_1 - n_2$.

10. Выведите выражение для углов наклона ТМ-мод, аналогичное (22). С помощью компьютера построьте график, аналогичный рис. 12, для ТМ-мод в волноводе с $\sin \bar{\theta}_{кр} = 0,3$ и $\lambda/2d = 0,1$. Каково число ТМ-мод?

11. Прямоугольный диэлектрический волновод имеет квадратное сечение площадью 10^{-2} мм² и числовую апертуру $NA = 0,1$. Используйте (46) для построения графика числа ТЕ-мод как функции частоты ν . Сравните ваши результаты с рис. 14.

12. Используйте (52) для определения коэффициентов связи между двумя идентичными пластинчатыми волноводами толщиной $d = 0,5$ мкм, расстояние между которыми $2a = 1$ мкм, показатели преломления $n_1 = n_2 = 1,48$, в среде с показателем преломления $n = 1,46$ при $\lambda_0 = 0,85$ мкм. Считайте, что оба волновода работают на ТЕ-моды с $m = 0$, и используйте результаты задачи 6 для нахождения поперечного распределения поля. Определите длину волновода, при которой он действует как 50%-делитель.

Тестовые задания по учебной программе

В процессе подготовки и выполнения тестовых заданий формируются и оцениваются все требуемые ФГОС и ООП по программе 03.06.01 «Физика и астрономия» (уровень подготовки кадров высшей квалификации), профиль: 01.04.05 «Оптика» компетенции: УК-5, ОПК-1, ПК-1.

Тестовые задания состоит из ряда теоретических вопросов по тематическим разделам рабочей программы учебной дисциплины.

Система оценок выполнения контрольного тестирования:

- «отлично» – количество правильных ответов от 85% до 100%;
- «хорошо» – количество правильных ответов от 70% до 84%;
- «удовлетворительно» – количество правильных ответов от 55% до 69%.

Ниже приводится пример контрольного тестирования в виде полного варианта одного из тестовых заданий.

Тест № 1. Волоконная оптика как коммуникационная среда

1. Перечислите основные компоненты волоконно-оптической системы.

- 1) Волоконно-оптический кабель, источник, детектор, соединители.
- 2) Источник, коаксиальный кабель, детектор, соединители.
- 3) Волоконно-оптический кабель, повторитель, соединители.
- 4) Волоконно-оптический кабель, источник, соединители.

2. По мере увеличения частоты сигнала потери в медном / оптическом кабеле...

- 1) Уменьшаются / не изменяются.
- 2) Уменьшаются / увеличиваются.
- 3) Увеличиваются / не изменяются.
- 4) Без изменений / уменьшаются.

3. Что из ниже перечисленного является наиболее важным следствием широкой полосы пропускания оптического волокна?

- 1) Высокая скорость и информационная емкость линий.
- 2) Меньшее число повторителей.
- 3) Невосприимчивость по отношению к электромагнитным полям.
- 4) Все выше перечисленное.

4. Перечислите наиболее важные преимущества оптики как коммуникационной среды.

- 1) Широкая полоса пропускания, нечувствительность к электромагнитным помехам, низкие потери.
- 2) Малый вес, малый размер.
- 3) Безопасность, секретность.
- 4) Все выше перечисленные.

5. По мере распространения сигнала в оптическом кабеле затухание...

- 1) Не зависит от частоты и остается постоянным в определенном диапазоне частот.
- 2) Зависит от частоты и остается постоянным в определенном диапазоне частот.
- 3) Не зависит от частоты и изменяется в диапазоне частот.
- 4) Зависит от частоты и изменяется в диапазоне частот.

6. Как называется волокно с переменным показателем преломления луча?

- 1) Волокно со ступенчатым индексом.
- 2) Многомодовое волокно.
- 3) Волокно со сглаженным индексом.
- 4) Волокно со смещенной дисперсией.

7. Модовая дисперсия может быть уменьшена с помощью...

- 1) Использованием ядра с меньшим диаметром.
- 2) Использованием волокна со сглаженным индексом.
- 3) Использованием одномодового волокна.
- 4) Всех упомянутых выше способов.

8. При уменьшении диаметра ядра в оптоволокне широта пропускания / потери...

- 1) Уменьшаются / уменьшаются.
- 2) Увеличиваются / уменьшаются.
- 3) Увеличиваются / увеличиваются.
- 4) Без изменений / увеличиваются.

9. Что определяет затухание в оптоволокне?

- 1) Рассеяние.
- 2) Поглощение.
- 3) Потери на стыках и изгибах.
- 4) Все выше перечисленные.

10. Какое главное требование при вытяжке оптоволокна?

- 1) Недопустимость образование микротрещин;
- 2) Достаточная механическая прочность;
- 3) Однородность диаметра волокна;
- 4) Все перечисленные.

4.2 Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации

4.2.1 Вопросы, выносимые на зачет по дисциплине «Волноводная оптоэлектроника» для программы 03.06.01 «Физика и астрономия» (уровень подготовки кадров высшей квалификации), профиль: 01.04.05 «Оптика»

В процессе подготовки и сдачи зачета формируются и оцениваются все требу-

емые ФГОС и ООП по программе 03.06.01 «Физика и астрономия» (уровень подготовки кадров высшей квалификации), профиль: 01.04.05 «Оптика» компетенции: УК-5, ОПК-1, ПК-1.

1. Распространение электромагнитных ТЕМ-волн в кусочно-однородных средах: лучевое и модовое описание.
2. Геометрическая оптика трехслойных диэлектрических волноводов. Волноводные моды и характеристическое уравнение для обычных и нормированных переменных.
3. Электромагнитная теория планарных волноводов. Поперечные электрические и магнитные направляемые моды.
4. Применение ЭВМ для расчета характеристик планарных волноводов. Дисперсионные (b, V) -диаграммы. Планарные волноводы с градиентным профилем.
5. Приближенные методы расчета планарных градиентных волноводов. Нормированные кривые и условия одномодовости.
6. Приближенные методы расчета трехмерных градиентных волноводов. Метод эффективного показателя преломления.
7. Проектирование технологических условий изготовления одномодовых диффузионных и ионообменных волноводов.
8. Полуэмпирические соотношения связи между волноводными, геометрическими и технологическими параметрами планарных диффузионных волноводов.
9. Использование метода эффективного показателя преломления для получения дисперсионных уравнений и соотношений связи в канальном диффузионном волноводе.
10. Использование нормированных дисперсионных кривых для анализа свойств и выбора параметров канальных диффузионных волноводов.
11. Матричный метод расчета многослойных плоских волноводов. Теория 4-слойного асимметричного плоского волновода.
12. Элементная база интегрально-оптических схем. Методы расчета вносимых потерь в пассивных волноводных элементах. Волноводные переходы и соединения.
13. Элементы волноводной связи для ввода и вывода излучения. Согласование оптических волноводов, расположенных на одной и различных подложках.
14. Принцип направленной связи. Волноводные направленные ответвители мощности на основе канальных диффузионных волноводов.
15. Разветвления трехмерных оптических волноводов. Двухканальные делители мощности на основе канальных диффузионных волноводов.
16. Элементы изгиба канальных диффузионных волноводов. Расчет излучательных потерь на волноводных изгибах.
17. Методы расчета вносимых потерь и эффективности передачи мощности в волноводных пересечениях Х- и Y-типов.
18. Теория асимметричного плоского диэлектрического волновода с металлическим покрытием.
19. Основные характеристики оптических волноводных модуляторов и переключателей. Электрооптические модуляторы отражающего и переключающего типа.
20. Двухканальные волноводные электрооптические модуляторы. Электрооп-