

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

## **ИНТЕГРАЛЬНАЯ И ВОЛНОВОДНАЯ ФОТОНИКА**

Методические указания по самостоятельной работе  
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

2012

## **Башкиров, Александр Иванович**

Интегральная и волноводная фотоника = Интегральная и волноводная фотоника: методические указания по самостоятельной работе для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» / А.А. Башкиров; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2012. - 17 с.

Цель курса – сформировать у студентов умения и навыки в области волноводной фотоники для дальнейшего использования их при разработке и эксплуатации приборов и устройств современной интегральной и волноводной фотоники.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» по дисциплине «Интегральная и волноводная фотоника».

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ЭП

\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

## ИНТЕГРАЛЬНАЯ И ВОЛНОВОДНАЯ ФОТОНИКА

Методические указания по самостоятельной работе  
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

РАЗРАБОТЧИК

Доцент каф. ЭП

\_\_\_\_\_ А.И. Башкиров

\_\_\_\_\_ 2012 г

2012

## Содержание

Введение.....	5
Раздел 1 Введение .....	5
1.1 Содержание раздела.....	5
1.2 Методические указания по изучению раздела.....	5
1.3 Вопросы для самопроверки.....	5
Раздел 2 Планарные волноводы.....	5
2.1 Содержание раздела.....	5
2.2 Методические указания по изучению раздела.....	6
2.3 Вопросы для самопроверки.....	6
Раздел 3 Полосковые оптические волноводы .....	6
2.1 Содержание раздела.....	6
2.2 Методические указания по изучению раздела.....	6
2.3 Вопросы для самопроверки.....	6
Раздел 4 Потери в оптических волноводах .....	7
4.1 Содержание раздела.....	7
4.2 Методические указания по изучению раздела.....	7
4.3 Вопросы для самопроверки.....	7
Раздел 5 Интегрально-оптические элементы связи.....	7
5.1 Содержание раздела.....	7
5.2 Методические указания по изучению раздела.....	7
5.3 Вопросы для самопроверки.....	8
Раздел 6 Измерение параметров оптических волноводов .....	8
6.1 Содержание раздела.....	8
6.2 Методические указания по изучению раздела.....	8
6.3 Вопросы для самопроверки.....	8
Раздел 7 Пассивные интегрально – оптические элементы .....	8
7.1 Содержание раздела.....	8
7.2 Методические указания по изучению раздела.....	8
7.3 Вопросы для самопроверки.....	9
Раздел 8 Управление излучением в оптических волноводах .....	9
8.1 Содержание раздела.....	9
8.2 Методические указания по изучению раздела.....	9
8.3 Вопросы для самопроверки.....	9
Раздел 9 Волоконно-оптические элементы. Волноводные оптические усилители и лазеры .....	9
9.1 Содержание раздела.....	9
9.2 Методические указания по изучению раздела.....	10
9.3 Вопросы для самопроверки.....	10
10 Лабораторные работы.....	10
11 Практические занятия.....	11
12 Темы для самостоятельного изучения .....	13
Заключение .....	13
Список литературы .....	14

## **Введение**

Цель курса – сформировать у студентов умения и навыки в области волноводной фотоники для дальнейшего использования их при разработке и эксплуатации приборов и устройств современной интегральной и волноводной фотоники.

Студент должен получить базовые знания в области волноводной фотоники, включая физические принципы построения элементов и систем интегральной оптики, оптику планарных волноводов, физические эффекты и явления в волноводных структурах, конструирование и расчет пассивных и активных интегрально-оптических элементов и устройств фотоники.

### **Раздел 1 Введение**

#### **1.1 Содержание раздела**

Предмет интегральной и волноводной фотоники. История развития. Основные физические принципы построения элементов волноводной фотоники. Классификация оптических волноводов. Достижения и перспективы развития.

#### **1.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Введение» следует обратить внимание на основные физические принципы построения элементов волноводной фотоники.

#### **1.3 Вопросы для самопроверки**

1. Назовите основные физические принципы построения элементов волноводной фотоники.
2. Приведите классификацию оптических волноводов.

### **Раздел 2 Планарные волноводы**

#### **2.1 Содержание раздела**

Физические принципы волноводного распространения света в планарных волноводных структурах ступенчатого вида. Геометрическая оптика планарных волноводов. Дисперсионное уравнение ТЕ и ТМ мод пленочного планарного волновода. Электромагнитная теория планарных волноводов. Свойства мод пленочного и градиентных планарных волноводов. Нормированные параметры планарных волноводов

## **2.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Планарные волноводы» следует обратить внимание на классификацию планарных волноводов, классификацию мод планарного волновода, геометрическую оптику планарных волноводов, волноводные моды тонкоплёночного волновода, эффективную толщину волновода, геометрическую оптику градиентных планарных волноводов, волноводные моды градиентных планарных волноводов.

## **2.3 Вопросы для самопроверки**

1. Что такое планарный волновод?
2. Что такое волноводная мода?
3. Нарисуйте траекторию распространения волноводной моды тонкоплёночного волновода.
4. Что такое номер моды?
5. Что такое эффективная толщина волновода?
6. Нарисуйте траекторию распространения волноводной моды градиентного волновода.
7. Нарисуйте дисперсионные характеристики планарного волновода.

## **Раздел 3 Полосковые оптические волноводы**

### **2.1 Содержание раздела**

Технология изготовления полосковых волноводов. Расчет параметров полосковых волноводов. Области использования в интегральной оптоэлектронике и волноводной фотонике.

## **2.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Полосковые оптические волноводы» следует обратить внимание на классификацию полосковых волноводов, методы изготовления полосковых волноводов, основные результаты анализа, полученные для полосковых волноводов; метод эффективного показателя преломления для анализа волновода, волноводные моды полоскового волновода

## **2.3 Вопросы для самопроверки**

1. Нарисуйте основные типы полосковых волноводов.
2. Сколько индексов используют для нумерации моды и почему?
3. Что такое частота отсечки?
4. Что такое эффективный показатель преломления?

5. В чем заключается метод эффективного показателя преломления?
6. Нарисуйте распределение компонент поля  $\vec{E}$  для основных мод полосковых волноводов.

## **Раздел 4 Потери в оптических волноводах**

### **4.1 Содержание раздела**

Механизмы потерь в оптических волноводах. Поглощение света. Рассеяние света в другие моды волновода. Потери на изгибах. Методы определения потерь в оптических волноводах

### **4.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Потери в оптических волноводах» следует обратить внимание на механизмы потерь в оптических волноводах, физические процессы при распространении света в волноводе, связанные с потерями, поглощение света, рассеяние света в другие моды волновода, потери на изгибах, методы определения потерь в оптических волноводах.

### **4.3 Вопросы для самопроверки**

1. Что такое излучательная мода?
2. Нарисуйте m-линии, связанные с рассеянием света в плоскости волновода.
3. По каким причинам возникают потери в изогнутых волноводах?
4. Каков механизм рассеяния в другие моды?

## **Раздел 5 Интегрально-оптические элементы связи**

### **5.1 Содержание раздела**

Торцевой ввод излучения в планарные и полосковые волноводы. Суживающийся край. Призмный ввод. Решеточный элемент связи. Эффективность ввода излучения в планарный волновод. Элементы связи между оптическими волноводами (планарными и полосковыми). Стыковка планарных волноводов с оптическими волноводами.

### **5.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Интегрально-оптические элементы связи» следует обратить внимание на торцевой ввод излучения в планарные и полосковые волноводы, ввод излучения через суживающийся край, призмный ввод, решеточный элемент связи, элементы связи между

оптическими волноводами (планарными и полосковыми), стыковка планарных волноводов с полосковыми волноводами

### **5.3 Вопросы для самопроверки**

1. Назовите методы стыковки планарных волноводов с полосковыми волноводами.
2. Что такое эффективность ввода излучения в планарный волновод?
3. Объясните механизм ввода излучения через суживающийся край.
4. Назовите недостатки торцевого ввода излучения.

## **Раздел 6 Измерение параметров оптических волноводов**

### **6.1 Содержание раздела**

Измерение эффективных показателей преломления волноводных мод. Измерение показателя преломления материала пленки и толщины тонкопленочных волноводов. Измерение затухания в волноводе

### **6.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Измерение параметров оптических волноводов» следует обратить внимание на коэффициент затухания волноводов, на показатель преломления материала пленки и толщины тонкопленочных волноводов.

### **6.3 Вопросы для самопроверки**

1. Как измеряются эффективные показатели преломления волноводных мод?
2. Какова методика определения толщины пленки в волноводе?
3. Как можно измерить коэффициент затухания в планарном волноводе?

## **Раздел 7 Пассивные интегрально – оптические элементы**

### **7.1 Содержание раздела**

Планарные линзы: геодезические линзы, линзы с изменением эффективного показателя преломления, линзы Люнеберга. Торцевые отражатели. Планарные призмы. Планарные отражатели

### **7.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Пассивные интегрально-оптические элементы» следует обратить внимание на геодезические линзы, линзы с изменением

эффективного показателя преломления, линзы Люнеберга, торцевые и планарные отражатели, планарные призмы.

### **7.3 Вопросы для самопроверки**

1. Что такое геодезическая линза?
2. Чем определяется фокусное расстояние геодезической линзы?
3. Объясните механизм фокусировки света геодезической линзой.
4. Назовите недостатки Линзы Люнеберга.

## **Раздел 8 Управление излучением в оптических волноводах**

### **8.1 Содержание раздела**

Акустооптические методы управления светом в оптических волноводах. Дифракция волноводных оптических волн (ВОВ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Электрооптические (ЭО) методы управления излучением в волноводных структурах. Фазовые ЭО модуляторы. Электрооптические призмы. Полупроводниковые фотоприемники

### **8.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Управление излучением в оптических волноводах» следует обратить внимание на акустооптические методы управления светом в оптических волноводах, дифракцию волноводных оптических волн (ВОВ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ), электрооптические (ЭО) методы управления излучением в волноводных структурах, фазовые ЭО модуляторы

### **8.3 Вопросы для самопроверки**

1. За счет каких эффектов происходит изменение диэлектрической проницаемости среды под действием акустической волны?
2. Назовите типы ПАВ.
3. Как может быть представлено распределение деформаций и электрического поля в ПАВ?
4. Что такое коллинеарная дифракция?

## **Раздел 9 Волоконно-оптические элементы. Волноводные оптические усилители и лазеры**

### **9.1 Содержание раздела**

Топология оптической сети. Волоконные световоды. Волоконно-

оптические датчики. Полупроводниковые лазеры. Общие характеристики усилителей. Принцип работы эрбиевого усилителя. Оптическая схема эрбиевого волоконного усилителя. Теоретическое описание работы усилителя и его основные параметры

## **9.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Волоконно-оптические элементы. Волноводные оптические усилители и лазеры» следует обратить внимание на топологию оптической сети, световоды, полупроводниковые лазеры, на усилители.

## **9.3 Вопросы для самопроверки**

1. Назовите принципы устройства волоконных световодов?
2. Назовите основные характеристики волоконных световодов?
3. Перечислите основные типы волоконно-оптических датчиков.
4. Объясните принцип оптического усиления.

## **10 Лабораторные работы**

Прежде чем приступить к выполнению эксперимента, студенту необходимо внимательно ознакомиться с методическим описанием лабораторной работы. Методические описания содержат:

- 1) название работы, ее цель;
- 2) перечень приборов и принадлежностей;
- 3) общую часть (справочные сведения о сути изучаемого явления или эффекта);
- 4) методику проведения работы;
- 5) описание измерений;
- 6) обработку результатов измерений;
- 7) контрольные вопросы.

Основная часть времени, выделенная на выполнение лабораторной работы, затрачивается на самостоятельную подготовку. Студент должен понимать, что методическое описание – это только основа для выполнения работы, что навыки экспериментирования зависят не от качества описания, а от отношения студента к работе и что формально, бездумно проделанные измерения – это потраченное впустую время. Если студент приступает к работе без чёткого представления о теории изучаемого вопроса, он не может «узнать в лицо» физическое явление, не сумеет отделить изучаемый эффект от случайных помех, а также окажется не в состоянии судить об исправности и неисправности установки. Этому этапу выполнения работы предшествует «допуск к работе». Для облегчения подготовки к сдаче теоретического материала полезно ответить на контрольные вопросы, сформулированные в методическом описании.

Для успешного выполнения лабораторной работы студенту необходимо разобраться в устройстве установки или макета. Проверив приборы установки, подготовив их к работе, студент приступает к наблюдению тех эффектов или явлений, которым посвящена работа. Опыт экспериментальной работы нельзя приобрести без самостоятельного экспериментирования. Отсчёт измеряемых величин полагается производить с максимальной точностью.

Поэтому перед снятием результатов измерений необходимо проверять нулевые показания приборов и установить цены деления на шкалах.

Этап обработки результатов измерений не менее важен, чем проведение эксперимента. Многие физические законы, полученные в результате экспериментальных исследований, выражаются в виде математических формул, связывающих числовые значения физических характеристик. Поэтому обязательно следите за тем, чтобы, при выполнении тех или иных измерений, были разумно согласованы друг с другом точность определения различных величин.

Если в лабораторной работе исследуется зависимость одной величины от другой, эту зависимость следует представить графически. Число точек на различных участках кривой и масштабы выбираются с таким расчетом, чтобы наглядно были видны места изгибов, экстремумов и скачков. Кроме системы координат с равномерным масштабом применяют полулогарифмические и логарифмические шкалы.

Вычисление искомой величины содержит и расчет погрешностей измерения. Выполнение каждой из запланированных работ заканчивается предоставлением отчета. Требования к форме и содержанию отчета приведены в методических указаниях к лабораторным работам.

Ниже приведены названия лабораторных работ.

1. Исследование дисперсионных характеристик полосковых волноводов
2. Исследование фокусировки волноводных мод в планарных волноводах при помощи геодезической линзы
3. Исследование планарного акустооптического модулятора

## **11 Практические занятия**

Практические занятия по решению задач существенно дополняют лекции. В процессе анализа и решения задач студенты расширяют и углубляют знания, полученные из лекционного курса и учебников, учатся глубже понимать законы и формулы, разбираться в их особенностях, границах применения, приобретают умение применять общие закономерности к конкретным случаям. В процессе решения задач вырабатываются навыки вычислений, работы со справочной литературой, таблицами. Решение задач не только способствует закреплению знаний и тренировке в применении изучаемых законов, но и формирует особый стиль умственной деятельности.

На практических занятиях используются:

- 1) задачи-упражнения, помогающие студентам приобрести твёрдые навыки расчёта и вычислений;
- 2) задачи для демонстрации практического применения тех или иных законов;
- 3) задачи для закрепления и контроля знаний;
- 4) познавательные задачи.

Задачи для закрепления и контроля знаний и задачи-упражнения рассчитаны на использование готовых знаний, полученных из книг, лекций, от преподавателя. Решение таких задач опирается в основном на механизмы памяти и внимания. Оно в известном смысле полезно и даже необходимо.

Отличие познавательных задач от задач других видов состоит в том, что в процессе их решения обучающийся приобретает новые знания.

Если студент имеет слабую теоретическую подготовку, решение задач подобного рода может оказаться для него непосильным. Даже в этом случае, если, присутствуя на занятиях, он познакомится с ходом решения и результатом, этого будет недостаточно для достижения цели познавательной задачи. Поэтому нужно требовать, чтобы студенты готовили теоретический материал, и показывать им, что именно невыполнение этого требования приводит к неудаче при решении задач.

Для решения задач расчётного характера достаточно составить систему уравнений, а дальше всё сводится к математическим действиям. Некоторые задачи требуют для решения геометрических построений и использования графиков.

Несмотря на различие в видах задач, их решение можно проводить по следующему общему плану (некоторые пункты плана могут выпадать в некоторых конкретных случаях), который надо продиктовать студентам:

- 1) прочесть внимательно условие задачи;
- 2) посмотреть, все ли термины в условиях задачи известны и понятны (если что-то неясно, следует обратиться к учебнику, просмотреть решения предыдущих задач, посоветоваться с преподавателем);
- 3) записать в сокращенном виде условие задачи (когда введены стандартные обозначения, легче вспоминать формулы, связывающие соответствующие величины, чётче видно, какие характеристики заданы, все ли они выражены в одной системе единиц и т.д.);
- 4) сделать чертёж, если это необходимо (делая чертёж, нужно стараться представить ситуацию в наиболее общем виде);
- 5) произвести анализ задачи, вскрыть её физический смысл (нужно чётко понимать, в чем будет заключаться решение задачи);
- 6) установить, какие законы и соотношения могут быть использованы при решении данной задачи;
- 7) составить уравнения, связывающие физические величины, которые характеризуют рассматриваемые явления с количественной стороны;
- 8) решить эти уравнения относительно неизвестных величин, получить ответ в общем виде. Прежде чем переходить к численным значениям,

полезно провести анализ этого решения: он поможет вскрыть такие свойства рассматриваемого явления, которые не видны в численном ответе;

9) перевести количественные величины в общепринятую систему единиц (СИ), найти численный результат;

10) проанализировать полученный ответ, выяснить как изменяется искомая величина при изменении других величин, функцией которых она является, исследовать предельные случаи.

Приведённая последовательность действий при решении задач усваивается студентами, как правило, в ходе занятий, когда они на практике убеждаются в её целесообразности. Поэтому в конце занятия полезно подвести итог, сформулировать найденный алгоритм рассуждений. Заметим, впрочем, что не всегда может быть предложен алгоритм решения задачи.

При анализе задач на аудиторных занятиях полезно возвращаться к плану. Отклонение от него в большинстве случаев не позволяет студенту решить задачу. Тогда нужно напомнить ему, какой этап пропущен и указать, что именно это и послужило причиной неудачи.

## **12 Темы для самостоятельного изучения**

Темы для самостоятельного изучения обобщают приобретенные знания и позволяют студенту самостоятельно решать задачи. Тематика самостоятельных работ предполагает углубленное изучение нижепредложенных тем.

1. Полупроводниковые гетеролазеры.
2. Волоконно-оптические датчики с волокном в качестве чувствительного элемента.
3. Волоконно-оптические линии связи.
4. Волоконно-оптические гироскопы.
5. Волоконно-оптические лазеры.

Студент защищает реферат, по выбранной теме, на практическом занятии.

## **Заключение**

В итоге изучения тем студент должен твердо, как минимум знать следующие вопросы.

1. Классификация планарных волноводов.
2. Классификация мод планарного волновода.
3. Геометрическая оптика планарных волноводов.
4. Волноводные моды тонкоплёночного волновода.
5. Эффективная толщина волновода.
6. Геометрическая оптика градиентных планарных волноводов.
7. Волноводные моды градиентных планарных волноводов.
8. Классификация полосковых волноводов.
9. Методы изготовления полосковых волноводов.

10. Основные результаты анализа, полученные для полосковых волноводов.
11. Метод эффективного показателя преломления для анализа волновода.
12. Волноводные моды полоскового волновода.
13. Механизмы потерь в оптических волноводах
14. Физические процессы при распространении света в волноводе, связанные с потерями.
15. Поглощение света.
16. Рассеяние света в другие моды волновода.
17. Потери на изгибах.
18. Методы определения потерь в оптических волноводах.
19. Торцевой ввод излучения в планарные и полосковые волноводы.
20. Ввод излучения через суживающийся край.
21. Призмный ввод.
22. Решеточный элемент связи.
23. Элементы связи между оптическими волноводами (планарными и полосковыми).
24. Стыковка планарных волноводов с полосковыми волноводами.
25. Геодезические линзы.
26. Линзы с изменением эффективного показателя преломления.
27. Линзы Люнеберга.
28. Торцевые отражатели.
29. Планарные призмы
30. Планарные отражатели.
31. Акустооптические методы управления светом в оптических волноводах.
32. Дифракция волноводных оптических волн (ВОВ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ).
33. Электрооптические (ЭО) методы управления излучением в волноводных структурах.
34. Фазовые ЭО модуляторы

### **Список литературы**

1. Башкиров А.И., Буримов Н.И. Исследование планарного акустооптического модулятора: Руководство к лабораторной работе. - Томск: ТУСУР, 2002. - 11 с. (экз. 15).
2. Башкиров А.И., Литвинов Р.В. Исследование дисперсионных характеристик полосковых волноводов: Руководство к лабораторной работе. - Томск : ТУСУР, 2001. - 7 с. (экз. 15).
3. Башкиров А.И., Литвинов Р.В. Исследование фокусировки волноводных мод в планарных волноводах при помощи геодезической линзы: Руководство к лабораторной работе. - Томск : ТУСУР, 2001. - 10 с. (экз. 15).

4. Волноводная оптоэлектроника / Ред. Т. Тамир. - М.: Мир, 1991. - 574 с.
5. Н.Н.Евтихеев, О.А.Евтихеева, И.Н.Компанец, А.Е.Краснов, Ю.Н.Кульчин, С.Б.Одинокоев, Б.С.Ринкевичус. Информационная оптика: Учебное пособие для вузов. - М.: Издательство МЭИ, 2000. - 612 с.
6. Никоноров Н.В., Шандаров С.М. Волноводная фотоника: Учебное пособие. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. - 142 с. <http://window.edu.ru/resource/410/73410/files/nikonov1.pdf>.
7. Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. – М.: Радио и связь, 1990.– 225 с.
8. Шангина Л.И. Квантовая и оптическая электроника: Учебное методическое пособие по практическим занятиям. - Томск: ТУСУР, 2012. - 228 с. <http://edu.tusur.ru/training/publications/714>.
9. Шандаров В.М. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: учебное пособие. - Томск: ТУСУР, 2012. - 198 с. <http://edu.tusur.ru/training/publications/741>
10. Шандаров В.М. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: Учебно-методическое пособие по практическим занятиям. – Томск: ТУСУР, 2012. – 31 с. <http://edu.tusur.ru/training/publications/742>

Учебное пособие

Башкиров А.И.

Интегральная и волноводная фотоника

Методические указания по самостоятельной работе

Усл. печ. л. \_\_\_\_\_ Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40