

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

А.И. Башкиров

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания по организации самостоятельной работы и практических
занятий

Томск
2022

УДК 621.373.8

ББК 32.854

Б 334

Рецензент:

Аксенов А.И., доцент каф. электронных приборов ТУСУР, канд. техн. наук

Башкиров, Александр Иванович

Б 334 Интегральная оптоэлектроника: методические указания по организации самостоятельной работы и практических занятий / А.И. Башкиров. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. - 11 с.

Настоящие методические указания по организации самостоятельной работы и практических занятий для студентов составлены с учетом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО).

Методические указания предназначены для студентов очной формы обучения, обучающихся по направлениям 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника», 12.04.03 «Фотоника и оптоинформатика» по дисциплинам «Интегральная оптоэлектроника», «Интегральная фотоника», «Волноводная фотоника».

Одобрено на заседании каф. ЭП протокол № 02-22 от 04.02.2022 г.

УДК 621.373.8

ББК 32.854

© Башкиров Александр Иванович,
2022

© Томск, гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2022

Оглавление

Введение	4
1. Оптические волноводы	4
1.1 Содержание раздела	4
1.2 Методические указания по изучению раздела	4
1.3 Вопросы для самопроверки	4
2. Пассивные интегрально – оптические элементы. Управление излучением в оптических волноводах	5
2.1 Содержание раздела	5
2.2 Методические указания по изучению раздела	5
2.3 Вопросы для самопроверки	5
3 Волноводные оптические усилители и лазеры	5
3.1 Содержание раздела	5
3.2 Методические указания по изучению раздела	5
3.3 Вопросы для самопроверки	5
4. Оптические волокна	6
4.1 Содержание раздела	6
4.2 Методические указания по изучению раздела	6
4.3 Вопросы для самопроверки	6
5 Лабораторные работы	6
6 Практические занятия	8
7 Темы для самостоятельного изучения	9
Заключение	10
Список рекомендуемой литературы	11

Введение

Цель изучения дисциплины – подготовка студентов к разработке, исследованию и эксплуатации приборов и устройств современной интегральной оптоэлектроники на основе изучения базовых физических принципов функционирования основных элементов интегральной оптоэлектроники

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

1. Оптические волноводы

1.1 Содержание раздела

Классификация оптических волноводов. Геометрическая оптика планарных волноводов. Эффект Гуса–Хенхена. Условие поперечного резонанса для планарного волновода. Электромагнитная теория планарных волноводов. Моды тонкопленочного волновода. Технология изготовления полосковых волноводов. Расчет параметров полосковых волноводов. Области использования в интегральной оптоэлектронике. Потери на изгибе полосковых волноводов.

1.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Оптические волноводы» следует обратить внимание на классификацию мод планарного волновода, интерпретацию распространения оптического излучения в планарных волноводах с позиции геометрической оптики, понятие эффективной толщины волновода, дисперсионные характеристики волноводов; классификацию полосковых волноводов, отличия в классификации мод планарных и полосковых волноводов, методы анализа распространения света в полосковых волноводах.

1.3 Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение волноводной моды.
2. Как классифицируют волноводные моды в зависимости от поляризации оптического излучения?
3. Нарисуйте траекторию распространения волноводной моды тонкопленочного волновода.
4. Как определяется номер волноводной моды?
5. Что такое эффективная толщина волновода?
6. Нарисуйте траекторию распространения волноводной моды градиентного волновода.
7. Нарисуйте дисперсионные характеристики планарного волновода.
8. Как связаны количество мод волновода с длиной волны оптического излучения?
9. Нарисуйте основные типы полосковых волноводов.
10. Сколько индексов используют для нумерации моды полосковых волноводов и почему?
11. В чем заключается метод эффективного показателя преломления?
12. Нарисуйте распределение компонент поля \vec{E} для основных мод полосковых волноводов.
13. По каким причинам возникают потери на изгибе полоскового волновода?

2. Пассивные интегрально – оптические элементы. Управление излучением в оптических волноводах

2.1 Содержание раздела

Торцевой ввод излучения в планарные и полосковые волноводы. Призмный ввод. Решеточный элемент связи. Элементы связи между оптическими волноводами (планарными и полосковыми). Планарные линзы: геодезические линзы, линзы с изменением эффективного показателя преломления. Торцевые отражатели. Акустооптические методы управления светом в оптических волноводах. Электрооптические (ЭО) методы управления излучением в волноводных структурах.

2.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Пассивные интегрально – оптические элементы. Управление излучением в оптических волноводах» следует обратить внимание на торцевой ввод излучения в планарные и полосковые волноводы, решеточный элемент связи, элементы связи между оптическими волноводами, физические принципы работы планарных линз, акустооптическое взаимодействие в оптических волноводах, электрооптические методы управления излучением в волноводах.

2.3 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.
5. Чем определяется угол при основании призмы для ввода оптического излучения в волновод?
6. Чем определяется фокусное расстояние геодезической линзы?
7. Объясните механизм фокусировки света геодезической линзой.
8. Назовите недостатки Линзы Льюнеберга.
9. За счет каких эффектов происходит изменение диэлектрической проницаемости среды под действием акустической волны?
10. Назовите типы ПАВ.
11. Как может быть представлено распределение деформаций и электрического поля в ПАВ?
12. Что такое коллинеарная дифракция?
13. Нарисуйте схему электрооптического переключателя на связанных полосковых волноводах.

3 Волноводные оптические усилители и лазеры

3.1 Содержание раздела

Общие характеристики оптических усилителей. Принцип работы эрбиевого усилителя. Оптическая схема эрбиевого волоконного усилителя. Теоретическое описание работы усилителя и его основные параметры. Волоконные лазеры.

3.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Волноводные оптические усилители и лазеры» следует обратить внимание на принцип работы оптических усилителей, физические процессы при генерации излучения в волоконных лазерах.

3.3 Вопросы для самопроверки

1. Нарисуйте топологию оптической сети с волоконным эрбиевым оптическим усилителем.
2. Нарисуйте оптическую схему эрбиевого волоконного усилителя.

3. Объясните принцип оптического усиления в эрбиевых усилителях.
4. Какие преимущества имеют эрбиевые усилители?
5. Какие важнейшие характеристики оптического усилителя определяют его работу?
6. Чем определяется ширина полосы усиления эрбиевого усилителя?
7. Чем определяется равномерность коэффициента усиления эрбиевого усилителя в пределах рабочего спектрального диапазона?

4. Оптические волокна

4.1 Содержание раздела

Физические основы передачи света по оптическим волокнам. Характеристики стандартных оптических волокон. Волоконно-оптические кабели. Пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Уширение импульсных сигналов в стекловолкне. Виды потерь оптических сигналов в стекловолкнах. Оптические передатчики. Приемники волоконно-оптических систем связи.

4.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Оптические волокна» следует обратить внимание на физические основы передачи света по оптическим волокнам, способы преобразования электрических сигналов в оптические сигналы и обратно, работу приемных оптоэлектронных модулей.

4.3 Вопросы для самопроверки

1. Объясните принцип устройства оптических волокон.
2. Дайте определение числовой апертуры стекловолкна.
3. Объясните явление уширения импульсного оптического сигнала за счет расходимости светового пучка.
4. Объясните явление материальной дисперсии.
5. Чем отличается межмодовая дисперсия от материальной?
6. Назовите основные характеристики волоконных световодов.
7. Перечислите виды потерь в оптических волокнах. Перечислите виды волоконно-оптических систем связи (ВОСС).
8. Нарисуйте схему последовательной замкнутой ВОСС.
9. Что такое дуплексный режим работы ВОСС?
10. Как поддерживать постоянной разность пиковой и остаточной мощностей в оптическом передатчике?
11. Поясните принцип работы цепей стабилизации лазерного излучателя.
12. Поясните способ преобразования модулированного светового излучения в электрический сигнал.
13. Какие причины приводят к потерям в соединителях оптических волокон?

5 Лабораторные работы

5.1 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.

5.2 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.

5.3 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.

5.4 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. Измерение эффективных показателей преломления планарного волновода
2. Исследование дисперсионных характеристик полосковых волноводов
3. Исследование фокусировки волноводных мод в планарных волноводах при помощи геодезической линзы
4. Исследование планарного акустооптического модулятора

6 Практические занятия

6.1 Практические занятия по решению задач существенно дополняют лекции, а также направлены на формирование у студентов требуемых компетенций.

В процессе анализа и решения задач студенты расширяют и углубляют знания, полученные из лекционного курса и учебников, глубже понимают законы и формулы, разбираются 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.

6.2 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.

6.3 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.

6.4 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 сокращённом 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.

Темы практических занятий приведены ниже:

1. Расчет параметров планарных волноводов. Профиль показателя преломления, нормированная частота, числовая апертура.

2. Расчет параметров оптического волокна. Числовая апертура, временная дисперсия, межмодовая дисперсия.

Примеры решения типичных задач и задачи для самостоятельного решения приведены в [1 - 3].

Задачи по теме 1. «Расчет параметров планарных волноводов. Профиль показателя преломления, нормированная частота, числовая апертура» приведены в разделах 4 [1], 1.3, 1.4 [2].

Задачи по теме 2. «Расчет параметров оптического волокна. Числовая апертура, временная дисперсия, межмодовая дисперсия» приведены в разделах 2.4, 2.5, 2.7, 2.8, 2.10, 2.11 [2], 5.2, 5.3 [3].

7 Темы для самостоятельного изучения

7.1 Темы для самостоятельного изучения обобщают приобретенные знания и позволяют студенту самостоятельно решать задачи. В результате самостоятельного изучения тем студенты приобретают требуемые компетенции.

7.2 Тематика самостоятельных работ предполагает углубленное изучение нижеперечисленных тем.

1. Устройство и принцип действия инжекционного монолазера.
2. Волновые уравнения для градиентных планарных волноводов.
3. Волоконные лазеры на основе вынужденного комбинационного рассеяния.
4. Ширина и равномерность полосы усиления оптических усилителей.
5. Цифровые волоконно-оптические системы связи.
6. Элементы связи между волноводами и волокнами.
7. Планарные линзы Люнеберга.
8. Фазовые ЭО модуляторы.

Студент защищает реферат по выбранной теме на практическом занятии.

Заключение

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

1. Каким образом достигается инверсия в полупроводниковом лазере?
2. Механизм накачки в инжекционном лазере.
3. Классификация мод планарного волновода.
4. Волноводные моды тонкоплёночного волновода.
5. Эффективная толщина волновода.
6. Волноводные моды градиентных планарных волноводов.
7. Методы изготовления полосковых волноводов.
8. Основные результаты анализа, полученные для полосковых волноводов.
9. Метод эффективного показателя преломления для анализа волновода.
10. Потери на изгибах.
11. Принцип устройства оптических волокон.
12. Числовая апертура стекловолокна.
13. Явление уширения импульсного оптического сигнала за счет расходимости светового пучка.
14. Явление материальной дисперсии.
15. Чем отличается межмодовая дисперсия от материальной?
16. Способ преобразования модулированного светового излучения в электрический сигнал.
17. Торцевой ввод излучения в планарные и полосковые волноводы.
18. Ввод излучения через суживающийся край.
19. Решеточный элемент связи.
20. Элементы связи между оптическими волноводами (планарными и полосковыми).
21. Стыковка планарных волноводов с полосковыми волноводами.
22. Геодезические линзы.
23. Линзы Люнеберга.
24. Акустооптические методы управления светом в оптических волноводах.
25. Дифракция волноводных оптических волн (ВОВ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ).
26. Электрооптические (ЭО) методы управления излучением в волноводных структурах.
27. Фазовые ЭО модуляторы.

Список рекомендуемой литературы

1. Шандаров, В.М. Основы физической и квантовой оптики. Сборник задач для студентов: Учебно-методическое пособие/ В.М. Шандаров. – Томск: ТУСУР, 2012. – 59 с.
2. Ефанов, В.И. Сборник задач по волоконно-оптическим линиям связи: Учебно-методическое пособие по практическим занятиям/ В.И. Ефанов. – Томск: ТУСУР, 2012. – 50 с.
3. Шангин, А. С. Интегральная и волноводная фотоника: Методические указания к практическим занятиям/ А. С. Шангин. – Томск: ТУСУР, 2012. – 75 с.