

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

А. Е. Мандель

Оптика фотонных материалов

Методические указания по проведению практических занятий и организации
самостоятельной работы студентов технических направлений подготовки и
специальностей

Томск
2025

УДК 535
ББК 22.343
М–23

Рецензент:

Безпалый А.Д., доцент кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
ТУСУР, канд. техн. наук

Мандель Аркадий Евсеевич

М-23 Оптика фотонных материалов: учебно-методическое пособие / А. Е. Мандель –
Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025. – 14с.

Приводится программа дисциплины «Оптика фотонных материалов», ее цели и задачи. Приведено содержание лекционного курса. Каждый модуль дисциплины заканчивается методическими указаниями. Представлены темы практических занятий и перечень индивидуальных заданий. Рассмотрены виды самостоятельной работы студентов при изучении дисциплины. Приводится список тестовых вопросов и перечень вопросов, необходимых для подготовке к зачету. Методические указания предназначены для студентов технических направлений подготовки и специальностей.

Одобрено на заседании каф. СВЧиКР протокол № 2 от 27.09.2024 г.

УДК 535
ББК 22.343

© Мандель А. Е., 2025
© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Цели и задачи дисциплины.....	5
2 Объем дисциплины и виды учебной деятельности.....	6
3 Содержание лекционных разделов дисциплины.....	7
3.1 Электродинамический анализ распространения света в фотонных кристаллах.....	7
3.2 Оптические микрорезонаторы	7
3.3 Технология и материалы для изготовления фотонных кристаллов	7
3.4 Управление оптическими свойствами фотонных материалов.....	7
3.5 Электрические и магнитные свойства сред в оптическом диапазоне. Метаматериалы и их применение	7
3.6 Устройства оптоэлектроники на основе фотонных кристаллов	8
4 Практические занятия (семинары).....	9
5 Методические рекомендации	10
6 Список тестовых заданий и вопросов к дифференцированному зачету	11
6.1 Список вопросов дифференцированного зачета	11
6.2 Список тестовых заданий для дифференцированного зачета.....	11
Список литературы	14

Введение

Практические занятия являются связующим звеном между теорией и практикой, на них учащиеся углубляют и закрепляют теоретические знания, полученные на лекциях. Правильно организованные практические занятия способствуют формированию будущего специалиста, который сможет не только выполнять работу по заданию предприятия, но и вести самостоятельный творческий поиск, приобретает навыки анализировать и обобщать полученную информацию.

Эффективной формой организации обучения в высшей школе являются семинарские занятия, с которыми органично сочетаются лекции. Семинар - вид практических занятий, который предусматривает самостоятельную проработку студентами отдельных тем и проблем в соответствии содержания учебной дисциплины и обсуждение результатов этого изучения, представленных в виде тезисов, сообщений, докладов, рефератов и т.д.

Самостоятельная работа студентов является частью учебного процесса при подготовке квалифицированных специалистов, способных самостоятельно и творчески решать стоящие перед ними задачи. В ходе самостоятельной работы формируются важнейшие профессиональные навыки будущего специалиста, такие как: внутренняя готовность к самообразованию в профессиональной сфере, самостоятельность, инициативность и ответственность, умение работать с источниками информации.

Каждая дисциплина должна иметь методическое сопровождение по самостоятельному изучению разделов и тем, указанных в рабочей программе, по написанию рефератов, выполнению лабораторных работ. В связи с этим эффективная организация самостоятельной работы студентов требует проведения целого ряда мероприятий, создающих предпосылки и условия для реализации самостоятельной работы, а именно:

- обеспечение студентов информационными ресурсами (учебными пособиями, справочниками, банками индивидуальных заданий);
- обеспечение студентов методическими материалами (учебно-методическими практикумами, сборниками задач, указаниями по выполнению лабораторных работ);
- наличие материальных ресурсов (ПК, измерительного и технологического оборудования для выполнения заданий в рамках НИР и ГПО);
- организации консультаций преподавателей.

Важным элементом в организации самостоятельной работы студентов является контроль. Контроль требует разработки преподавателем контролирующих материалов в текстовом или тестовом исполнении, а при использовании ПК - пакета прикладных программ для проверки знаний студентов. Эффективная система контроля (в т.ч. электронная система контроля), наряду с рейтинговой системой оценки знаний, позволит добиться систематической самостоятельной работы студентов над учебными материалами и повысить качество обучения.

Пособие разработано для студентов технических направлений подготовки и специальностей.

1 Цели и задачи дисциплины

Целью дисциплины «Оптика фотонных материалов» является формирование у студентов понимания физических основ оптики фотонных материалов для последующего использования этих знаний при построения современных устройств интегральной фотоники и оптоэлектроники.

Основными задачами дисциплины являются

1. Приобретение студентами знаний о физических основах оптики фотонных материалов, методах использования фотонных материалов в устройствах интегральной фотоники и оптоэлектроники.

2. Приобретение студентами навыков экспериментальных исследований в области оптики фотонных материалов

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование у студентов следующих компетенций.

ПК-3. Способности проектировать объекты профессиональной деятельности

ПК-5. Способен к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов

В результате изучения дисциплины студенты должны:

знать основные модели жизненного цикла проекта элементов и устройств интегральной фотоники и оптоэлектроники на основе фотонных материалов, их характеристики и особенности применения;

знать теорию эксперимента, способы его организации, современные средства и методы проведения экспериментальных исследований в области интегральной фотоники и оптоэлектроники;

уметь разрабатывать и реализовывать этапы проекта в области интегральной фотоники и оптоэлектроники;

уметь планировать, организовывать и проводить экспериментальные исследования с применением современных средств и методов;

владеть навыками работы в области реализации проектов интегральной фотоники и оптоэлектроники;

владеть навыками планирования, организации, проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных.

2 Объем дисциплины и виды учебной деятельности

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 академических часов.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам учебной деятельности представлено в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Трудоемкость дисциплины по видам учебной деятельности

Виды учебной деятельности	Всего часов	Семестры 1 семестр
Контактная аудиторная работа обучающихся с преподавателем, всего	36	36
Лекционные занятия	18	18
Практические занятия	18	18
Самостоятельная работа обучающихся, в т.ч. контактная внеаудиторная работа обучающихся с преподавателем, всего	180	180
Подготовка к зачету с оценкой	108	108
Подготовка к тестированию	72	72
Общая трудоемкость (в часах)	216	216
Общая трудоемкость (в з.е.)	6	6

3 Содержание лекционных разделов дисциплины

3.1 Электродинамический анализ распространения света в фотонных кристаллах

Классификация фотонных кристаллов: одномерные, двумерные и трехмерные фотонные кристаллы. Волновая теория распространения света в фотонном кристалле. Многолучевая интерференция. Запрещенные и разрешенные зоны фотонного кристалла. Виды дефектов в структуре фотонных кристаллов. Разрешенные энергетические уровни в запрещенной зоне. Интерференция в многомерных структурах.

3.2 Оптические микрорезонаторы

Элементы физики твердого тела. Модель свободного электрона. Расщепление энергетических уровней атома на зоны при образовании кристалла. Распределение энергетических зон в твердом теле. Деление веществ на проводники, диэлектрики, изоляторы. Аналогия между физикой твердого тела и оптикой периодических сред. Оптические микрорезонаторы. Эффект туннелирования в оптических микрорезонаторах. Образование энергетических разрешенных полос из дискретных уровней за счет туннельных переходов. Зоны Бриллюэна.

3.3 Технология и материалы для изготовления фотонных кристаллов

Фотонные кристаллы в природе. Опалы, инвертированные опалы. Методы изготовления фотонных кристаллов. Методы, использующие самопроизвольное формирование фотонных кристаллов. Методы, использующие травление объектов. Голографические методы формирования фотонных кристаллов. Способы получения одномерных, двумерных и трехмерных периодических структур. Периодические доменные структуры.

3.4 Управление оптическими свойствами фотонных материалов

Управление оптическими свойствами фотонного кристалла путем приложения внешнего электрического поля. Эффекты Поккельса и Керра. Управление оптическими свойствами фотонного кристалла путем приложения внешнего магнитного поля. Эффекты Фарадея и Фогта. Спектр прохождения света через магнитный фотонный кристалл. Магнитные фотонные кристаллы с дефектами чередования слоев. Управление оптическими свойствами фотонного кристалла путем изменения давления или температуры. Управление спектром и интенсивностью излучения локализованных атомов. Эффект Перселла.

3.5 Электрические и магнитные свойства сред в оптическом диапазоне. Метаматериалы и их применение

Преломление и отражение света на границе раздела двух сред. Положительное и отрицательное преломление света. Изочастотные линии. Преломление и отражение света в фотонном кристалле. Классификация материалов в зависимости от их диэлектрической и магнитной проницаемостей. Искусственные магнитные материалы. Метаматериалы (левые среды) и их применение. Различия метаматериалов и фотонных кристаллов.

3.6 Устройства оптоэлектроники на основе фотонных кристаллов

Волноводы с остроугольным изгибом. Оптические транзисторы. Фотонно-кристаллическое волокно. Микролазеры без инверсии населенности. Оптические переключатели и мультиплексоры. Магнитооптические модуляторы света. Преобразователи частоты оптического излучения.

4 Практические занятия (семинары)

По дисциплине предусмотрено 9 двухчасовых практических занятий. На практических занятиях студентами докладываются результаты выполнения индивидуальных заданий (рефератов). Темы рефератов соответствуют темам практических занятий.

Реферат оформляется согласно требованиям ТУСУР и должен иметь титульный лист, содержание, основную часть, заключение, список использованных источников. В списке источники (книги, статьи, патенты) приводить с указанием полных выходных данных и с номером в квадратных скобках по тексту. Оформление: формат А4, Word 2003, Times NR 12 pt, выравнивание по ширине, переносы, межстрочный единичный интервал, формулы в Equation Editor. Объем не менее 15 страниц. Время на презентацию 20-25 мин.

Темы практических занятий по разделам дисциплины

Раздел 3.1 Электродинамический анализ распространения света в фотонных кристаллах

1. Методы расчета фотонной запрещенной зоны одномерных фотонных кристаллов.
2. Оптические и магнитооптические эффекты в фотонных кристаллах

Раздел 3.6 Устройства оптоэлектроники на основе фотонных кристаллов

1. Устройства оптоэлектроники на основе фотонных кристаллов

Темы докладов на практических занятиях

1. Методы расчета фотонной запрещенной зоны одномерных фотонных кристаллов.
2. Способы получения одномерных, двумерных и трехмерных периодических структур.
3. Фотонные кристаллы с дефектами чередования слоев.
4. Управление оптическими свойствами фотонного кристалла путем приложения внешнего электрического поля.
5. Управление оптическими свойствами фотонного кристалла путем приложения внешнего магнитного поля.
6. Метаматериалы (левые среды) и их применение.
7. Устройства оптоэлектроники на основе фотонных кристаллов: волноводы с остроугольным изгибом.
8. Устройства оптоэлектроники на основе фотонных кристаллов: оптические переключатели и мультиплексоры.
9. Устройства оптоэлектроники на основе фотонных кристаллов: магнитооптические модуляторы света.
10. Устройства оптоэлектроники на основе фотонных кристаллов: микролазеры без инверсии населенности.
11. Устройства оптоэлектроники на основе фотонных кристаллов: преобразователи частоты оптического излучения.

5 Методические рекомендации

Учебный материал излагается в форме, предполагающей самостоятельное мышление студентов, самообразование. При этом самостоятельная работа студентов играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Начать изучение дисциплины необходимо со знакомства с рабочей программой, списком учебно-методического и программного обеспечения. Самостоятельная работа студента включает работу с учебными материалами, выполнение контрольных мероприятий, предусмотренных учебным планом.

В процессе изучения дисциплины для лучшего освоения материала необходимо регулярно обращаться к рекомендуемой литературе и источникам, указанным в учебных материалах; пользоваться через кабинет студента на сайте Университета образовательными ресурсами электронно-библиотечной системы, а также общедоступными интернет-порталами, содержащими научно-популярные и специализированные материалы, посвященные различным аспектам учебной дисциплины.

При самостоятельном изучении тем следуйте следующим рекомендациям:

- чтение или просмотр материала осуществляйте со скоростью, достаточной для индивидуального понимания и освоения материала, выделяя основные идеи;
- на основании изученного материала составляйте тезисы;
- освоив материал, попытайтесь соотнести теорию с примерами из практики;
- если в тексте встречаются незнакомые или малознакомые термины, следует выяснить их значение для понимания дальнейшего материала;

Студенты могут получать индивидуальные консультации, в т.ч. с использованием средств телекоммуникации.

6 Список тестовых заданий и вопросов к дифференцированному зачету

Подготовка к зачету способствует систематизации, обобщению и закреплению знаний студентов, устранению пробелов, возникающих в процессе учебных занятий. Зачет может проводиться либо в виде устного опроса по вопросам, сформулированным ниже, либо в виде выполнения тестовых заданий.

6.1 Список вопросов дифференцированного зачета

1. Классификация фотонных кристаллов.
2. Запрещенные и разрешенные зоны фотонного кристалла.
3. Виды дефектов в структуре фотонных кристаллов.
4. Разрешенные энергетические уровни в запрещенной зоне.
5. Деление веществ на проводники, диэлектрики, изоляторы.
6. Оптические микрорезонаторы.
7. Локализованные атомы. Управление спектром и интенсивностью излучения локализованных атомов.
8. Эффект туннелирования в оптических микрорезонаторах.
9. Фотонные кристаллы в природе.
10. Методы изготовления искусственных фотонных кристаллов.
11. Управление оптическими свойствами фотонного кристалла путем приложения внешнего электрического поля.
12. Управление оптическими свойствами фотонного кристалла путем приложения внешнего магнитного поля.
13. Магнитные фотонные кристаллы с дефектами чередования слоев.
14. Устройства оптоэлектроники на основе фотонных кристаллов.

6.2 Список тестовых заданий для дифференцированного зачета

1. Укажите диапазон длин волн видимого излучения:

а) 380 - 780 нм
б) 300 - 600 нм
в) 0,4 - 0,7 нм
г) 100 - 750 нм
2. Оптическая длина луча в однородной среде:

а) это произведение геометрической длины пути луча на показатель преломления среды
б) это длина оптического вектора
в) это длина оптического вектора в квадрате
г) это геометрическая длина пути луча, деленная на показатель преломления сред
3. Когерентными называются волны, которые имеют

а) одинаковую частоту и постоянную времени разность фаз
б) одинаковую поляризацию и одинаковые амплитуды
в) одинаковые начальные фазы и одинаковую поляризацию
г) одинаковые амплитуды и одинаковые начальные фазы

4. Оптическая разность хода двух волн монохроматического света $0,5\lambda$. Разность фаз этих волн равна:

- а) $0,3\pi$
- б) $0,6\pi$
- в) $0,7\pi$
- г) $1,0\pi$

5. Фотонный кристалл — это:

- а) твердотельная структура с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью, период которой сравним с длиной волны света
- б) твердотельная структура с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью период которой много больше длины волны света
- в) твердотельная структура с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью период которой много меньше длины волны света
- г) нет правильного ответа

6. Фотонные кристаллы по характеру изменения коэффициента преломления можно разделить на

- а) одномерные, двумерные, трехмерные
- б) одномерные, двумерные, многомерные
- в) одномерные, двумерные
- г) одномерные, трехмерные

7. Природный фотонный кристалл — это

- а) опал
- б) рубин
- в) алмаз
- г) изумруд

8. Фотонная запрещенная зона представляет собой:

- а) диапазон частот, в котором распространение света запрещено во всех направлениях
- б) диапазон частот, в котором распространение света разрешено во всех направлениях
- в) диапазон частот, в котором распространение света запрещено в одном направлении
- г) нет правильного ответа

9. Продольный магнитооптический эффект Фарадея заключается в том, что:

- а) при прохождении линейно-поляризованного света через оптически неактивное вещество, находящееся в магнитном поле, наблюдается вращение плоскости поляризации света.
- б) при прохождении линейно-поляризованного света через оптически неактивное вещество, находящееся в магнитном поле, свет становится эллиптически поляризованным
- в) при прохождении линейно-поляризованного света через оптически неактивное вещество, находящееся в магнитном поле, свет приобретает круговую поляризацию
- г) нет правильного ответа

10. Магнитооптический эффект Керра заключается в том, что:

- а) при отражении линейно поляризованного света от поверхности намагниченного материала наблюдается вращение плоскости поляризации света, а свет становится эллиптически поляризован
- б) при отражении линейно поляризованного света от поверхности намагниченного материала наблюдается вращение плоскости поляризации света
- в) при отражении линейно поляризованного света от поверхности намагниченного материала свет становится эллиптически поляризован
- г) нет правильного ответа

Список литературы

1. Дегтяренко, Н. Н. Введение в физику и моделирование фотонных кристаллов: учебное пособие [Электронный ресурс] / Н. Н. Дегтяренко, Н. И. Каргин. — Москва: НИЯУ МИФИ, 2012. — 148 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/75933>.
2. Перин, А. С. Основы физической и квантовой оптики: Учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 12.04.03 «Фотоника и оптоинформатика» [Электронный ресурс] / А. С. Перин, В. М. Шандаров. — Томск: ТУСУР, 2018. — 195 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/10352>
3. Шандаров С. М Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах: монография [Электронный ресурс] / С.М. Шандаров, В.М. Шандаров, А.Е. Мандель, Н.И. Буримов. — Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. — 242 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1553>