

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

Кафедра электронных приборов

ФИЗИКА ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

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

2012

**Щербина, Веста Вячеславовна
Шандаров, Станислав Михайлович**

Физика фотонных кристаллов = Физика фотонных кристаллов: методические указания по самостоятельной работе для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» / В.В. Щербина, С.М. Шандаров; 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. - 14 с.

Целью изучения дисциплины является освоение студентами теоретических основ строения таких твердотельных материалов, как фотонные кристаллы, изучение их свойств, процессов и эффектов в них происходящих.

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать: фундаментальные физические закономерности, определяющие свойства кристаллических и некристаллических материалов;

уметь: выполнять оценочные расчеты электрических, механических и тепловых характеристик фотонных кристаллов;

иметь: представление о современном состоянии методов исследования в области физики фотонных кристаллов.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» по дисциплине «Физика фотонных кристаллов».

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.

ФИЗИКА ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

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

РАЗРАБОТЧИКИ:
ассистент каф. ЭП
_____ В.В. Щербина

профессор каф. ЭП
_____ С.М. Шандаров

2012

Содержание

Введение	5
Раздел 1 Введение.....	5
1.1 Содержание раздела	5
1.2 Методические указания по изучению раздела	6
1.3 Вопросы для самопроверки	6
Раздел 2 Методы описания зонной структуры фотонных кристаллов	6
2.1 Содержание раздела	6
2.2 Методические указания по изучению раздела	7
2.3 Вопросы для самопроверки	7
Раздел 3 Оптические и магнитооптические эффекты в фотонных кристаллах ..	7
3.1 Содержание раздела	7
3.2 Методические указания по изучению раздела	8
3.3 Вопросы для самопроверки	8
Раздел 4 Методы описания нелинейно-оптического отклика фотонных кристаллов и нелинейного распространения света в фотонных кристаллах	8
4.1 Содержание раздела	8
4.2 Методические указания по изучению раздела	9
4.3 Вопросы для самопроверки.....	9
Раздел 5 Нелинейные фотонные кристаллы и оптические сверхрешетки.	9
5.1 Содержание раздела	9
5.2 Методические указания по изучению раздела	10
5.3 Вопросы для самопроверки	10
Раздел 6 Нелинейно-оптические и нелинейные магнитооптические эффекты в фотонных кристаллах	10
6.1 Содержание раздела	10
6.2 Методические указания по изучению раздела	11
6.3 Вопросы для самопроверки	11
12 Темы для самостоятельного изучения.....	11
13 Тестовые вопросы.....	Ошибка! Закладка не определена.
Заключение.....	12

Введение

Целью изучения дисциплины является освоение студентами теоретических основ строения таких твердотельных материалов, как фотонные кристаллы, изучение их свойств, процессов и эффектов в них происходящих.

Задачи дисциплины заключаются в изучении:

- основ строения фотонных кристаллов
- основных характеристик и свойств фотонных кристаллов
- основных процессов и эффектов, происходящие в фотонных кристаллах
- применения фотонных кристаллов в современных приборах и устройствах фотоники и оптоинформатики
- современных оптических устройств, в основе которых применяются фотонные кристаллы.

Изучение дисциплины "Физика фотонных кристаллов", входящей в цикл специальных дисциплин специализированной подготовки магистра при реализации магистерской программы «Фотоника волноводных, нелинейных и периодических структур» основано на фундаментальной физико-математической подготовке и базируется на следующих дисциплинах: физика, математика, оптическая физика, физика твердого тела, теория информации и информационных систем, оптическое материаловедение, основы фотоники, основы оптоинформатики, физические основы квантовой и оптической электроники из цикла базовой подготовки бакалавров по направлению «Фотоника и оптоинформатика».

Изучение дисциплины «Физика фотонных кристаллов» представляет собой базу для дисциплин таких как «Основы фотоники», «Оптическое материаловедение», «Основы оптоинформатики», и для большинства специальных дисциплин, связанных с технологией, проектированием и конструированием приборов фотоники, квантовой и оптической электроники, волоконной и интегральной оптики.

Раздел 1 Введение

1.1 Содержание раздела

Определение и базовые понятия о микроструктурах с фотонной запрещенной зоной - фотонная зона Бриллюэна, закон дисперсии, фотонная зонная структура, фотонная запрещенная зона.

Модовая структура оптического поля внутри фотонных кристаллов - волновое уравнение и задача о модовой структуре поля, фазовая и групповая скорости, плотность фотонных состояний.

Аналогии фотонных кристаллов с твердым телом. Дефекты (вакансии и примеси) в фотонных кристаллах. Поверхностные ("таммовские") состояния.

Базовые оптические и нелинейно-оптические эффекты в фотонных кристаллах и оптических сверхрешетках. Материалы для создания фотонных кристаллов.

1.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Введение» следует обратить внимание на основные понятия о микроструктурах с фотонной запрещенной зоной - фотонная зона Бриллюэна, закон дисперсии, фотонная зонная структура, фотонная запрещенная зона.

1.3 Вопросы для самопроверки

1. Каков физический смысл фотонной запрещенной зоны?
2. Что такое фотонная зона Бриллюэна?
3. Назовите примеры природных фотонных кристаллов.
4. Запишите волновое уравнение для модовой структуры оптического поля внутри фотонных кристаллов.
5. Какой физический смысл имеет плотность фотонных состояний?
6. Опишите примеси и вакансии в фотонных кристаллах.
7. Опишите фотонную зонную структуру и фотонную запрещенную зону.
8. Что такое поверхностные ("таммовские") состояния?
9. Назовите аналогии фотонных кристаллов с твердым телом?
10. Назовите и кратко опишите нелинейно-оптические эффекты в фотонных кристаллах и оптических сверхрешетках.

Раздел 2 Методы описания зонной структуры фотонных кристаллов

2.1 Содержание раздела

Методы расчета фотонной запрещенной зоны одномерных, двумерных и трехмерных фотонных кристаллов. Общая формулировка в рамках формализма функций Грина.

Расчет зонной структуры трехмерных фотонных кристаллов. Метод разложения по сферическим волнам, расчет закона дисперсии и пропускания трехмерного массива диэлектрических сфер. Классификация фотонных мод трехмерной решетки. Задача о трехмерной дифракции в фотонных кристаллах.

Методы расчета фотонной запрещенной зоны двумерных фотонных кристаллов. Метод конечных разностей, метод разложения по плоским волнам. Классификация фотонных мод двумерной квадратной и гексагональной решеток.

Расчет зонной структуры одномерных фотонных кристаллов. Метод

матриц распространения и рекуррентный метод. Формализм эффективной среды.

Расчет дефектных мод фотонных кристаллов. Микрорезонаторы. Нульмерные (точечные) и одномерные (линейчатые) дефекты в двумерных фотонных кристаллах с квадратной и гексагональной решетками. Поверхностные ("таммовские") состояния.

Суперструктуры на основе фотонных кристаллов. Связанные микрорезонаторы. "Фотонные" молекулы.

2.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Методы описания зонной структуры фотонных кристаллов» следует обратить внимание на основные методы расчета фотонной запрещенной зоны одномерных, двумерных и трехмерных фотонных кристаллов.

2.3 Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные методы расчета фотонной запрещенной зоны одномерных, двумерных и трехмерных фотонных кристаллов.
2. В чем сущность метода разложения по сферическим волнам?
3. Приведите классификацию фотонных мод трехмерной решетки.
4. Опишите особенности задачи трехмерной дифракции в фотонных кристаллах.
5. В чем состоит метод конечных разностей, метод разложения по плоским волнам?
6. Классификация фотонных мод двумерной квадратной и гексагональной решеток.
7. Опишите метод матриц распространения и рекуррентный метод.
8. В чем заключается формализм эффективной среды?
9. Как производится расчет дефектных мод фотонных кристаллов?
10. Нульмерные (точечные) и одномерные (линейчатые) дефекты в двумерных фотонных кристаллах с квадратной и гексагональной решетками.

Раздел 3 Оптические и магнитооптические эффекты в фотонных кристаллах

3.1 Содержание раздела

Подавление спонтанного излучения атомов внутри фотонных кристаллов. Управление спектром нулевых вакуумных флуктуации. Лэмбовский сдвиг в фотонных кристаллах.

Сингулярности плотности фотонных состояний. Гигантская оптическая дисперсия и аномальная групповая скорость. Компрессия сверхкоротких

лазерных импульсов в фотонных кристаллах.

Эффекты локализации электромагнитного поля и управление фотонной запрещенной зоной. Локализация света в фотонных кристаллах с дефектами.

Магнитофотонные кристаллы и микрорезонаторы. Усиление эффекта Фарадея и магнитооптического эффекта Керра в магнитофотонных кристаллах и микрорезонаторах.

Распространение света в квазипериодических фотонных кристаллах. Квазикристаллы типа Фибоначчи. Компрессия и декомпрессия сверхкоротких лазерных импульсов в квазикристаллах. Биение мод и аномально малая групповая скорость.

3.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Оптические и магнитооптические эффекты в фотонных кристаллах» следует обратить внимание на основные эффекты в фотонных кристаллах.

3.3 Вопросы для самопроверки

1. Как происходит подавление спонтанного излучения атомов внутри фотонных кристаллов?
2. За счет чего возможно управление спектром нулевых вакуумных флуктуации?
3. Что такое лэмбовский сдвиг в фотонных кристаллах.?
4. Опишите сингулярности плотности фотонных состояний.?
5. Что такое гигантская оптическая дисперсия и аномальная групповая скорость?
6. Опишите эффекты локализации электромагнитного поля и управление фотонной запрещенной зоной?
7. Как происходит локализация света в фотонных кристаллах с дефектами?
8. Изобразите магнитофотонный кристалл и микрорезонатор.
9. Опишите эффект Фарадея и магнитооптический эффект Керра в магнитофотонных кристаллах и микрорезонаторах?
10. Что такое квазикристаллы типа Фибоначчи?

Раздел 4 Методы описания нелинейно-оптического отклика фотонных кристаллов и нелинейного распространения света в фотонных кристаллах

4.1 Содержание раздела

Решение неоднородного волнового уравнения в двумерных и трехмерных фотонных кристаллах методом функций Грина.

Расчет параметрических процессов в одномерных фотонных кристаллах рекуррентными методами и нелинейными матрицами распространения.

Автомодельные решения нелинейного волнового уравнения. Солитонное и волноводное распространение света в фотонных кристаллах с квадратичной и кубической восприимчивостями.

4.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Методы описания нелинейно-оптического отклика фотонных кристаллов и нелинейного распространения света в фотонных кристаллах» следует обратить внимание на нелинейно-оптический отклик фотонных кристаллов и нелинейное распространение света в фотонных кристаллах.

4.3 Вопросы для самопроверки

1. Неоднородное волновое уравнение в двумерных фотонных кристаллах.
2. Неоднородное волновое уравнение в трехмерных фотонных кристаллах.
3. Функция Грина для решения неоднородного волнового уравнения в двумерных и трехмерных фотонных кристаллах.
4. Расчет параметрических процессов в одномерных фотонных кристаллах рекуррентными.
5. Расчет параметрических процессов в одномерных фотонных кристаллах нелинейными матрицами распространения.
6. Автомодельные решения нелинейного волнового уравнения.
7. Солитонное распространение света в фотонных кристаллах с квадратичной восприимчивостью.
8. Волноводное распространение света в фотонных кристаллах с квадратичной восприимчивостью.
9. Солитонное распространение света в фотонных кристаллах с кубической восприимчивостью.
10. Волноводное распространение света в фотонных кристаллах с кубической восприимчивостью.

Раздел 5 Нелинейные фотонные кристаллы и оптические сверхрешетки.

5.1 Содержание раздела

Понятие о нелинейных фотонных кристаллах. Двумерный фазовый синхронизм при генерации второй гармоники в нелинейных фотонных кристаллах. Двумерная нелинейная дифракция в нелинейных фотонных кристаллах.

Оптические сверхрешетки. Параметрическое взаимодействие волн, фазовый синхронизм при генерации второй гармоники, суммарной и разностной частоты в оптических сверхрешетках.

Нелинейные квазикристаллы и аперидические оптические сверхрешетки. Генерация второй и третьей гармоники в условиях разового синхронизма в аперидических сверхрешетках и структурах типа Кантора и Фибоначчи.

5.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Нелинейные фотонные кристаллы и оптические сверхрешетки» следует обратить внимание на основные нелинейные фотонные кристаллы и оптические сверхрешетки.

5.3 Вопросы для самопроверки

1. Что такое двумерный фазовый синхронизм при генерации второй гармоники в нелинейных фотонных кристаллах?
2. Что такое двумерная нелинейная дифракция в нелинейных фотонных кристаллах.
3. Что такое нелинейные фотонные кристаллы?
4. Что такое оптическая сверхрешетка?
5. Параметрическое взаимодействие волн в оптических сверхрешетках.
6. Фазовый синхронизм при генерации второй гармоники, суммарной и разностной частоты в оптических сверхрешетках.
7. Что такое нелинейные квазикристаллы и аперидические оптические сверхрешетки?
8. На чем базируется генерация второй и третьей гармоники в условиях разового синхронизма в аперидических сверхрешетках?
9. Что такое структуры типа Кантора?
10. Что такое структуры типа Фибоначчи.?

Раздел 6 Нелинейно-оптические и нелинейные магнитооптические эффекты в фотонных кристаллах

6.1 Содержание раздела

Эффекты на кубичной восприимчивости. Суперконтинуум и бистабильность в фотонных кристаллах.

Усиление трехфотонных параметрических процессов в фотонных кристаллах. Генерация суммарной частоты и второй гармоники в условиях фазового синхронизма на краю фотонной запрещенной зоны.

Особенности четырехфотонных параметрических процессов в фотонных кристаллах. Неколлинearное четырехволновое смешение, усиление генерации третьей оптической гармоники.

Нелинейно-оптические эффекты в магнитофотонных кристаллах. Нелинейный магнитооптический эффект Керра при генерации второй и третьей оптических гармоник. Нелинейная магнитооптическая дифракция.

6.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Нелинейно-оптические и нелинейные магнитооптические эффекты в фотонных кристаллах» следует обратить внимание на основные нелинейно-оптические и нелинейные магнитооптические эффекты в фотонных кристаллах.

6.3 Вопросы для самопроверки

1. Какие эффекты основаны на кубической восприимчивости?
2. Что называют суперконтинуумом в фотонных кристаллах?
3. Что называют бистабильность в фотонных кристаллах?
4. Как происходит усиление трехфотонных параметрических процессов в фотонных кристаллах?
5. В чем заключаются особенности генерация суммарной частоты условиях фазового синхронизма на краю фотонной запрещенной зоны?
6. В чем заключаются особенности генерация второй гармоники в условиях фазового синхронизма на краю фотонной запрещенной зоны?
7. В чем заключаются особенности четырехфотонных параметрических процессов в фотонных кристаллах.
8. Как происходит коллинеарное четырехволновое смешение, усиление генерации третьей оптической гармоники?
9. Опишите основные нелинейно-оптические эффекты в магнитофотонных кристаллах.
10. Что такое нелинейный магнитооптический эффект Керра?

12 Темы для самостоятельного изучения

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

1. Методы изготовления фотонных кристаллов различных размерностей
 2. Методы создания оптических сверхрешетках и нелинейных фотонных кристаллов
 3. Применения фотонных кристаллов
 4. Расширение фотонных кристаллов
- Студент защищает реферат, по выбранной теме.

Заключение

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

1. Определение и базовые понятия о микроструктурах с фотонной запрещенной зоной - фотонная зона Бриллюэна, закон дисперсии, фотонная зонная структура, фотонная запрещенная зона.

2. Модовая структура оптического поля внутри фотонных кристаллов - волновое уравнение и задача о модовой структуре поля, фазовая и групповая скорости, плотность фотонных состояний.

3. Аналогии фотонных кристаллов с твердым телом. Дефекты (вакансии и примеси) в фотонных кристаллах. Поверхностные ("таммовские") состояния.

4. Базовые оптические и нелинейно-оптические эффекты в фотонных кристаллах и оптических сверхрешетках. Материалы для создания фотонных кристаллов.

5. Методы расчета фотонной запрещенной зоны одномерных, двумерных и трехмерных фотонных кристаллов. Общая формулировка в рамках формализма функций Грина.

6. Расчет зонной структуры трехмерных фотонных кристаллов.

7. Метод разложения по сферическим волнам, расчет закона дисперсии и пропускания трехмерного массива диэлектрических сфер.

8. Классификация фотонных мод трехмерной решетки.

9. Методы расчета фотонной запрещенной зоны двумерных фотонных кристаллов.

10. Метод конечных разностей, метод разложения по плоским волнам.

11. Классификация фотонных мод двумерной квадратной и гексагональной решеток.

12. Расчет зонной структуры одномерных фотонных кристаллов. Метод матриц распространения и рекуррентный метод.

13. Расчет дефектных мод фотонных кристаллов. Микрорезонаторы.

14. Нульмерные (точечные) и одномерные (линейчатые) дефекты в двумерных фотонных кристаллах с квадратной и гексагональной решетками.

15. Поверхностные ("таммовские") состояния.

16. Суперструктуры на основе фотонных кристаллов.

17. Связанные микрорезонаторы.

18. Подавление спонтанного излучения атомов внутри фотонных кристаллов.

19. Управление спектром нулевых вакуумных флуктуации.

20. Лэмбовский сдвиг в фотонных кристаллах.

21. Сингулярности плотности фотонных состояний.

22. Гигантская оптическая дисперсия и аномальная групповая скорость.

23. Компрессия сверхкоротких лазерных импульсов в фотонных кристаллах.

24. Эффекты локализации электромагнитного поля и управление фотонной запрещенной зоной.
25. Локализация света в фотонных кристаллах с дефектами.
26. Магнитофотонные кристаллы и микрорезонаторы.
27. Усиление эффекта Фарадея и магнитооптического эффекта Керра в магнитофотонных кристаллах и микрорезонаторах.
28. Распространение света в квазипериодических фотонных кристаллах.
29. Квазикристаллы типа Фибоначчи.
30. Оптические сверхрешетки.

Список литературы

1. Шандаров С.М., Шандаров В.М., Мандель А.Е., Буримов Н.И. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах. - Томск: ТУСУР, 2007. – 241 с. ISBN 978-5-86889-426-8.
2. Шандаров С.М. Буримов Н.И. Фоторефрактивная нелинейная оптика: учебное методическое пособие. - Томск: ТУСУР, 2007. – 39 с
3. Гуртов В.А. Физика твердого тела для инженеров : учебное пособие / В. А. Гуртов, Р. Н. Осауленко. - М. : Техносфера, 2007. – 518 с. - ISBN 978-5-94836-141-3
4. Манцызов Б.И. Когерентная и нелинейная оптика фотонных кристаллов / Б.И. Манцызов. - М.: Физматлит, 2009. - 208 с.– ISBN 978-5-9221-1201-7
5. Белотелое В.И. Фотонные кристаллы и другие метаматериалы. / Белотелое В.И., Звездин А.К. Библиотечка «Квант». Вып. 94. Приложение к журналу «Квант», 2006. - № 2
6. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. // Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. - СПб.: Наука, 1992. - 320 с.
7. Шабанов В.Ф. Оптика реальных фотонных кристаллов. Жидкокристаллические дефекты, неоднородности./ Шабанов В.Ф., Ветров С.Я., Шабанов А.В. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005. – 209 с. ISBN 5-7692-0737-X
8. С. В. Гапоненко, Н. Н. Розанов, Е. Л. Ивченко, А. В. Федоров, А. В. Баранов, А. М. Бонч-Бруевич, Т. А. Вартанян, С. Г. Пржибельский. Оптика наноструктур / Под редакцией А. В. Федорова. – СПб: Недра, 2005. – 326 с.

Учебное пособие

Щербина Веста Вячеславовна
Шандаров Станислав Михайлович

Физика фотонных кристаллов

Методические указания по самостоятельной работе

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