

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

## КОГЕРЕНТНАЯ И НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Методические указания по самостоятельной работе  
для студентов направления 200700 «Фотоника и оптоинформатика»

2013

Щербина, Веста Вячеславовна

Шандаров, Станислав Михайлович

Когерентная и нелинейная оптика фотонных кристаллов: методические указания по самостоятельной работе для студентов направления 20700 «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, 2013. - 16 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 формы, обучающихся по направлению 200700 «Фотоника и оптоинформатика» по дисциплине «Когерентная и нелинейная оптика 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

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

## КОГЕРЕНТНАЯ И НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Методические указания по самостоятельной работе  
для студентов направления 200700 «Фотоника и оптоинформатика»

РАЗРАБОТЧИКИ:

ассистент каф. ЭП

\_\_\_\_\_ В.В. Щербина

профессор каф. ЭП

\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров

2013

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

6.1 Содержание раздела .....	11
6.2 Методические указания по изучению раздела.....	12
6.3 Вопросы для самопроверки.....	12
12 Темы для самостоятельного изучения.....	12
Заключение.....	13

## **Введение**

Целью 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; изучении основных характеристик и свойств фотонных кристаллов; изучении основных процессов и эффектов, происходящие в фотонных кристаллах; применения фотонных кристаллов в современных приборах и устройствах фотоники и оптоинформатики.

Изучение дисциплины «Когерентная и нелинейная оптика фотонных кристаллов» базируется на материале дисциплин профессионального цикла: «Актуальные проблемы науки и индустрии фотоники и оптоинформатики», «Оптические солитоны» и представляет собой базу для дисциплин профессионального цикла, таких как «Методы управления оптическим излучением», «Фотоника наноконструированных материалов и наноплазмоники».

## **Раздел 1 Оптические эффекты в фотонных кристаллах**

### **1.1 Содержание раздела**

Методы описания зонной структуры фотонных кристаллов. 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.

Оптические и магнитооптические эффекты в фотонных кристаллах.

Подавление спонтанного излучения атомов внутри фотонных кристаллов. Управление спектром нулевых вакуумных флуктуаций. 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 кристаллов.

## 1.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Оптические эффекты в фотонных кристаллах» 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.
11. Назовите основные методы расчета фотонной запрещенной зоны одномерных, двумерных и трехмерных фотонных кристаллов.
12. В чем сущность метода разложения по сферическим волнам?
13. Приведите классификацию фотонных мод трехмерной решетки.
14. Опишите особенности задачи трехмерной дифракции в фотонных кристаллах.
15. В чем состоит метод конечных разностей, метод разложения по плоским волнам?
16. Классификация фотонных мод двумерной квадратной и гексагональной решеток.
17. Опишите метод матриц распространения и рекуррентный метод.
18. В чем заключается формализм эффективной среды?
19. Как производится расчет дефектных мод фотонных кристаллов?
20. Нульмерные (точечные) и одномерные (линейчатые) дефекты в двумерных фотонных кристаллах с квадратной и гексагональной решетками.



## **Раздел 2 Нелинейно-оптические явления в фотонных кристаллах.**

### **2.1 Содержание раздела**

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

Нелинейные фотонные кристаллы и оптические сверхрешетки.

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 аперриодические оптические сверхрешетки. Генерация второй и третьей гармоники в условиях фазового синхронизма в аперриодических сверхрешетках и структурах типа Кантора и Фибоначчи.

Нелинейно-оптические и нелинейные магнитооптические эффекты в фотонных кристаллах. Эффекты на кубической 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. Неколлинеарное 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.

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

При изучении раздела «Нелинейно-оптические явления в фотонных кристаллах» следует обратить внимание на основные методы расчета фотонной запрещенной зоны одномерных, двумерных и трехмерных фотонных кристаллов, на основные оптические свойства фотонных кристаллов.

### 2.3 Вопросы для самопроверки

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 3 Методы изготовления фотонных кристаллов различных размерностей.**

### 3.1 Содержание раздела

Методы изготовления фотонных кристаллов различных размерностей.

Основные материалы для изготовления фотонных кристаллов.

Примеры одномерных фотонных кристаллов. Брэгговские зеркала, микрорезонаторы, одномерные волноводы.

Двумерные фотонные кристаллы. Дырчатые волокна, макропористый кремний с гексагональной и квадратной решеткой, макропористый оксид алюминия.

Трехмерные фотонные кристаллы. Опалы, инвертированные опалы, самоагрегирующийся латекс.

Магнитофотонные кристаллы.

Методы создания оптических сверхрешетках и нелинейных фотонных кристаллов.

Создание оптических сверхрешеток. Периодические и квазипериодические доменные структуры.

Методы создания нелинейных фотонных кристаллов.

### 3.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Методы изготовления фотонных кристаллов различных размерностей» следует обратить внимание на основные способы создания фотонных кристаллах.

### 3.3 Вопросы для самопроверки

1. Основные методы изготовления фотонных кристаллов различных размерностей?
2. Какие основные материалы используются для изготовления фотонных кристаллов?
3. Принцип работы брэгговского зеркала?
4. Что такое двумерные фотонные кристаллы?
5. Как формируются дырчатые волокна?
6. Что такое трехмерные фотонные кристаллы?
7. Как формируются инвертированные опалы?
8. Что такое самоагрегирующийся латекс?
9. Как используются магнитофотонные кристаллы?
10. Методы создания оптических сверхрешетках и нелинейных фотонных кристаллов?
11. Как создаются оптические сверхрешетки?
12. Методы создания нелинейных фотонных кристаллов?

## **Раздел 4 Применения фотонных кристаллов.**

### 4.1 Содержание раздела

Устройства оптоэлектроники на основе фотонных кристаллов. Оптические диоды и транзисторы.

Дырчатые волокна. Микролазеры без инверсии населенности. Оптические переключатели и мультиплексоры. Магнитооптические модуляторы света.

Электромагнитные кристаллы для ИК и СВЧ областей. Фононные кристаллы. Спиновые (магнитные) кристаллы. Плазмонные кристаллы.

#### 4.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Применения фотонных кристаллов» следует обратить внимание на основные формы применения фотонных кристаллов.

#### 4.3 Вопросы для самопроверки

1. Устройства оптоэлектроники на основе фотонных кристаллов. Оптические диоды и транзисторы.

Дырчатые волокна. Микролазеры без инверсии населенности. Оптические переключатели и мультиплексоры. Магнитооптические модуляторы света. Электромагнитные кристаллы для ИК и СВЧ областей. Фононные кристаллы. Спиновые (магнитные) кристаллы. Плазмонные кристаллы.

### **5. 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. Повышение эффективности параметрического взаимодействия волн в нелинейных фотонных кристаллах.
2. Генерация уединенных волн при сверхизлучении в фотонном кристалле.
3. Управление светом при помощи света в фотонном кристалле.
4. Эффективность трехволнового параметрического взаимодействия волн в фотонном кристалле.
5. Генерация суммарной частоты и второй гармоники в условиях фазового синхронизма на краю фотонной запрещенной зоны.
6. Нелинейно-оптические эффекты в магнитофотонных кристаллах.
7. Генерация второй и третьей гармоники в условиях фазового синхронизма в аperiodических сверхрешетках и структурах типа Кантора и

Фибоначчи.

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

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:ГУСУР, 2007. – 241 с. ISBN 978-5-86889-426-8.
2. Манцызов Б.И. Когерентная и нелинейная оптика фотонных кристаллов. – М.:ФИЗМАТЛИТ,2009. – 208 с. – ISBN 978-5-9221-1201-7.
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. Белотелое В.И. Фотонные кристаллы и другие метаматериалы. / Белотелое В.И., Звездин А.К. Библиотечка «Квант». Вып. 94. Приложение к журналу «Квант», 2006. - № 2
5. 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
6. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. // Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. - СПб.: Наука, 1992. - 320 с.
7. Joannopoulos, R. Meade, and J. Winn, Photonic Crystals, Princeton University Press, 1995.
8. К. Sakoda, Optical Properties of Photonic Crystals, Springer, 2001.

Учебное пособие

Щербина Веста Вячеславовна  
Шандаров Станислав Михайлович

Когерентная и нелинейная оптика фотонных кристаллов

Методические указания по самостоятельной работе

Усл. печ. л. \_\_\_\_\_ Препринт

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

634050, г.Томск, пр.Ленина, 40