

РГБ 04

25 ДЕК 2000

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В.ЛОМОНОСОВА

---

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

*На правах рукописи*

УДК 535.345

ТАРАСИШИН АНДРЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕТОВЫХ  
ИМПУЛЬСОВ И ПУЧКОВ С ФОТОННЫМИ КРИСТАЛЛАМИ

Специальность: 01.04.21 - лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва - 2000

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов  
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Научные руководители: кандидат физико-математических наук,  
доцент С.А. Магницкий  
доктор физико-математических наук,  
профессор А.М. Желтиков

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор П.К. Кашкаров  
  
кандидат физико-математических наук,  
вед. науч. сотрудник В.Н. Семиногов

Ведущая организация: Институт проблем технологии  
микроэлектроники и особых чистых  
материалов РАН

Защита состоится “ 7 ” декабря 2000 года в “15-00” часов на заседании  
диссертационного совета К 053.05.21 в МГУ им. М.В. Ломоносова по адресу:  
119899, г. Москва, Воробьевы горы, МГУ, ул. Хохлова, д.1, Корпус Нелинейной  
Оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического  
факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан “ 3 ” ноября 2000 года

Ученый секретарь диссертационного совета  
К.053.05.21, кандидат физ.-мат. наук, доцент М.С. Полякова



B343.703

B372.134.03

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Настоящая диссертация посвящена теоретическому исследованию взаимодействий световых импульсов и пучков с фотонными кристаллами.

Фотонными кристаллами в современной научной литературе называют искусственные структуры с периодической модуляцией показателя преломления на пространственном масштабе порядка длины волны электромагнитного излучения оптического диапазона. В зависимости от размерности периодичности различают одно-, двух- и трехмерные фотонные кристаллы. К одномерным фотонным кристаллам, получившим наиболее широкое распространение в современных оптических устройствах, можно отнести дифракционные решетки, брэгговские волокна, многослойные диэлектрические покрытия и другие подобные структуры. К двумерным и трехмерным фотонным кристаллам относятся двумерные планарные дифракционные решетки, фотоннокристаллические волокна, объемные голограммы и синтетические опалы. Поскольку естественным аналогом фотонных кристаллов являются природные кристаллы для рентгеновского излучения, основополагающими исследованиями в области фотонных кристаллов, по-видимому, следует считать работы по дифракции рентгеновских лучей Л. Брэгга [1]. Следует отметить, что периодические структуры оптического диапазона на протяжении всего 20-го века также вызывали значительный интерес у исследователей. Наиболее интенсивно исследовались дифракционные решетки и одномерные многослойные периодические структуры, такие как диэлектрические интерференционные покрытия, РДС-структуры и т.п. Новый виток интереса к исследованию свойств периодических структур оптического диапазона, стимулированный работами Е.Яблоновича [2] и С.Джона [3] в середине восьмидесятых, был обусловлен возможностями управления спонтанным излучением в двумерных и трехмерных фотонных кристаллах. Яблонович в своей работе предложил использовать периодическую структуру для подавления спонтанного излучения в диодных лазерах и ввел термины фотонный кристалл (photonic crystal) и структура с запрещенной зоной фотонных энергий (photonic band gap structure). Запрещенной зоной фотонных

энергий называется область частот, для которой не существует решений уравнений Максвелла в виде бегущей волны ни в одном из направлений распространения в фотонном кристалле. В этом случае при падении световой волны из внешнего пространства на фотонный кристалл происходит полное отражение волны от границы раздела и экспоненциальное затухание света вглубь фотонного кристалла. ФЗЗ структурой (структурой с запрещенной зоной фотонных энергий) называется фотонный кристалл, у которого существует запрещенная зона фотонных энергий. Предположим, что в фотонном кристалле удалось реализовать замкнутую запрещенную зону фотонных энергий, т.е. плотность электромагнитных состояний для этих частот стремится к нулю. Вероятность испускания кванта света атомом или молекулой, в соответствии с золотым правилом Ферми, пропорциональна плотности состояний поля, в одно из которых данный квант может излучиться. Поэтому если частота атомного перехода лежит в области запрещенных фотонных энергий, спонтанное излучение с возбужденного атомного уровня отсутствует. В связи с вышесказанным необходимо также отметить работы В. Быкова [4], относящиеся к началу семидесятых годов, в которых автор активно обсуждает изменение скорости спонтанного излучения в периодических структурах.

Другое важное свойство фотонных кристаллов – высокая степень локализации поля. В случае если в фотонном кристалле существует область нарушенной периодичности, в зонной структуре возникают дефектные уровни энергий, аналогичные дефектным примесным уровням в полупроводниках. Атом может излучить квант с частотой, соответствующей дефектному уровню энергии, однако этот квант не может покинуть область дефекта и образуется связанное состояние фотон – атом. Уникальные возможности управления скоростью спонтанного излучения и локализацией света послужили первичной мотивацией исследований в области фотонных кристаллов. Таким образом, к началу прошедшего десятилетия возникло новое направление в лазерной физике – оптика фотонных кристаллов.

Возможности управления фазой световых импульсов, а также увеличения эффективности нелинейно-оптических процессов в ФЗЗ структурах представляются чрезвычайно полезными для применений фотонных кристаллов в качестве нелинейно-оптических преобразователей частоты и компрессоров коротких световых импульсов, в особенности предельно коротких лазерных

импульсов длительностью в несколько периодов световой волны. К настоящему времени методы генерации таких предельно коротких лазерных импульсов разработаны. С использованием лазера на сапфире с титаном со специальной конфигурацией зеркал были получены импульсы длительностью 6,5 фс. С применением техники полых световодов были получены еще более короткие импульсы длительностью порядка 5 фс с достаточно высокой энергией. Появление таких импульсов привело к возникновению нового раздела в лазерной физике - нелинейной оптики предельно коротких световых импульсов, где использование фотонных кристаллов может решить ряд важных задач. До сих пор исследования нелинейных режимов распространения световых импульсов в фотонных кристаллах в основном ограничивались пикосекундным диапазоном длительностей и слабым контрастом показателей преломления.

Одна из наиболее важных задач, стоявших перед исследователями на первом этапе, заключалась в расчете зонной структуры фотонных кристаллов. Наиболее развитым аппаратом исследования распространения электромагнитного излучения в периодических структурах, несомненно, является теория дифракции рентгеновских лучей. Поэтому, на первый взгляд, решение поставленной задачи заключалось в пространственном масштабировании результатов, полученных в рентгеновском диапазоне. Однако существует принципиальная разница между законами распространения оптических волн в фотонных кристаллах и рентгеновского излучения в естественных кристаллах. Периодическое изменение величины показателя преломления кристаллов для рентгеновского излучения составляет менее одной тысячной. Поэтому запрещенная зона может существовать лишь для очень малого углового спектра возможных направлений распространения электромагнитной волны. Для реализации же замкнутой запрещенной зоны, как показал последующий анализ, требуется контраст показателей преломления больше двух. Такой большой контраст показателей преломления налагает соответствующие требования и на строгость расчета. Теория дифракции рентгеновских лучей оказалась непригодной для расчета зонной структуры фотонных кристаллов с большим контрастом показателя преломления. Последующие попытки расчета зонной структуры основывались на методах, широко применяемых в физике твердого тела, в которых не может быть учтена векторная природа электромагнитного поля. Однако в условиях высокого

контраста показателя зонная структура фотонных энергий оказалась весьма чувствительной к поляризации излучения.

Задача расчета зонной структуры фотонного кристалла была решена при помощи так называемого метода плоских волн [5]. К преимуществам данного алгоритма следует отнести относительную простоту реализации и скорость расчета зонной структуры. Методом плоских волн были рассчитаны такие важные характеристики фотонных кристаллов, как ширина и положение запрещенной зоны в зависимости от параметров ФЗЗ-структуры: контраста показателей преломления и коэффициента заполнения. Однако, для решения следующей задачи - расчета спектра дефектных мод ФЗЗ-структур с дефектом решетки метод плоских волн оказался чрезмерно громоздким и неэффективным. Основная причина этого состоит в быстром увеличении ( $\sim N^3$ ) числа операций при усложнении элементарной кристаллической ячейки и связанного с этим увеличением числа базисных элементов ( $\sim N$ ).

Таким образом, на момент начала работ, составляющих материал данной диссертации, не существовало метода, адекватного задаче расчета оптических характеристик ФЗЗ-структуры с дефектом решетки, таких как спектр дефектных мод, распределение поля вблизи дефекта, спектр пропускания фотонного кристалла с конечным числом периодов.

В радиофизике существовал ряд строгих численных методов решения задач классической электродинамики. На наш взгляд, наиболее адекватным решением задач расчета оптических характеристик фотонных кристаллов являлся метод, основанный на прямом решении во времени векторных уравнений Максвелла, в которых пространственные и временные производные аппроксимированы конечными разностями (известный в англоязычной литературе как *finite-difference time-domain method* или FDTD). Однако вплоть до последнего времени, для решения этих задач метод FDTD практически не применялся. К 1997 году существовало лишь две работы, в которых были сделаны попытки применения метода FDTD к расчету оптических характеристик фотонных кристаллов. В первой публикации был предложен спектральный подход для расчета зонной структуры фотонных кристаллов, который можно отнести к некоторой модификации метода FDTD. Во второй работе с использованием метода FDTD был рассчитан сдвиг

запрещенной зоны одномерного фотонного кристалла с кубической нелинейностью в присутствии мощной накачки.

С конца 80-х до середины 90-х основная масса теоретических работ была посвящена расчету зонной структуры фотонных энергий. В то же время, математический аппарат, успешно применявшийся в физике твердого тела, оказался неадекватен задаче расчета оптических характеристик фотонных кристаллов, таких, как спектры отражения и пропускания, распространение световых импульсов и пучков, нелинейные взаимодействия в фотонных кристаллах.

1. W. H. Bragg and W.L. Bragg, X rays and crystal structure // 4<sup>th</sup> ed., rev. and enl., London, Bell, 1924.
2. E. Yablonovitch, Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // Phys. Rev. Lett., 1987, vol. 58, p. 2059.
3. S. John, Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // Phys. Rev. Lett., 1987, vol. 58, p. 2486.
4. В.П. Быков, Излучение атомов вблизи материальных тел: некоторые вопросы квантовой теории // М., Наука, 1986.
5. R.D Meade et. al., Accurate theoretical analysis of photonic band-gap materials // Phys. Rev. B, 1993, vol. 48, p. 8434.

## ЦЕЛИ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является теоретический анализ широкого класса линейных и нелинейных взаимодействий световых импульсов и пучков с одномерными и двумерными фотонными кристаллами, включая фазовую самомодуляцию и трансформацию огибающей предельно коротких световых импульсов, генерацию второй гармоники, локализацию света в фотонных кристаллах с нарушенной симметрией решетки.

ОСНОВНЫМИ ЗАДАЧАМИ ДИССЕРТАЦИИ ЯВЛЯЮТСЯ:

1. Разработка способов расчета оптических свойств фотонных кристаллов, а также распространения и нелинейных взаимодействий сверхкоротких световых импульсов и жестко сфокусированных пучков в одномерных и двумерных фотонных кристаллах методом численного решения уравнений Максвелла.

2. Расчет зонной структуры и спектра дефектных мод в двумерных фотонных кристаллах с треугольной симметрией решетки.
3. Исследование эффекта локализации электромагнитного поля в двумерных фотонных кристаллах с дефектом решетки.
4. Исследование распространения сверхкоротких лазерных импульсов в одномерных фотонных кристаллах с кубической нелинейностью.
5. Изучение процесса генерации второй гармоники сверхкоротких лазерных импульсов в одномерных фотонных кристаллах с квадратичной нелинейностью.

#### НАУЧНАЯ НОВИЗНА РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Показано, что метод, основанный на прямом решении во времени векторных уравнений Максвелла, в которых пространственные и временные производные аппроксимированы конечными разностями (метод FDTD) является полностью адекватным задаче о нелинейном взаимодействии световых импульсов и пучков в фотонных кристаллах.
2. Показано, что фотонные кристаллы с кубической нелинейностью позволяют реализовать сжатие сверхкоротких лазерных импульсов до длительностей, соответствующих нескольким периодам оптического поля на субмиллиметровой длине взаимодействия.
3. Показано, что нелинейные фотонные кристаллы позволяют одновременно обеспечить условия фазового и группового синхронизма для процесса генерации второй гармоники. При этом наличие синхронизма в объеме нелинейной среды, образующей фотонный кристалл, не требуется.
4. Исследован спектр дефектных мод двумерных фотонных кристаллов с треугольной симметрией решетки и пространственное распределение света, локализованного в дефекте.

#### ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ

1. Разработаны способы расчета распространения и нелинейных взаимодействий световых импульсов и пучков в одномерных и двумерных фотонных кристаллах.



2. Предложена идея компактного компрессора фемтосекундных лазерных импульсов на основе фотонных кристаллов.
3. Предложена идея синхронной генерации второй гармоники сверхкоротких лазерных импульсов в фотонных кристаллах, заполненных нелинейной средой с практически произвольным законом дисперсии.
4. Продемонстрирована перспективность использования фотонных кристаллов в качестве зондирующих устройств в микроскопии ближнего поля, а также для увеличения плотности информационных каналов в системах оптической передачи информации.

## ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

Автором разработан метод расчета линейных и нелинейных взаимодействий световых импульсов и пучков в одномерных и двухмерных фотонных кристаллах. Автором проводились все расчеты, изложенные в оригинальных главах диссертации. Автором предложена идея об использовании высокой дисперсии фотонных кристаллов для компрессии сверхкоротких лазерных импульсов. Автором предложена идея использования фотонных кристаллов с целью обеспечения одновременного выполнения условий фазового и группового синхронизма при генерации второй гармоники сверхкоротких лазерных импульсов. Автором предложено использование фотонных кристаллов в микроскопии ближнего поля.

## ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Дефектные моды фотонных кристаллов позволяют достичь высокой степени локализации поля в области с характерным размером менее длины волны. Спектры дефектных мод фотонных кристаллов смещаются в сторону высоких частот при уменьшении контраста показателей преломления дефекта и матрицы. Поле на выходе фотонного кристалла с дефектом решетки обладает свойствами нррадиационной волны, что позволяет достичь пространственного разрешения в ближнем поле, существенно превышающего длину волны излучения.

2. Способы расчета, основанные на прямом решении во времени векторных уравнений Максвелла, в которых пространственные и временные производные аппроксимированы конечными разностями, являются эффективным способом описания фотонных кристаллов и позволяют рассчитывать оптические свойства фотонных кристаллов (зонная структура, спектры пропускания и спектры дефектных мод), а так же распространение и нелинейные взаимодействия сверхкоротких световых импульсов и жестко сфокусированных лучков в одномерных и двумерных фотонных кристаллах.
3. Одномерные фотонные кристаллы с кубичной нелинейностью могут быть использованы в качестве компактных компрессоров, позволяющих сжимать фемтосекундные лазерные импульсы до длительностей в несколько периодов световой волны на субмиллиметровой пространственной шкале.
4. Дисперсия фотонных кристаллов позволяет одновременно выполнить условия фазового и группового синхронизма для процесса генерации второй гармоники независимо от наличия синхронизма в объеме нелинейного материала. При этом ожидаемая эффективность генерации второй гармоники существенно выше, чем в условиях квазисинхронизма.

## АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты изложены в 17 научных публикациях в различных периодических изданиях и в 12 публикациях в материалах конференций. Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. I Международная конференция по сверхсильным полям в плазме (Варезина, Италия, 1997)
2. XVI Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике (Москва, 1998)
3. Германно-Российский лазерный симпозиум (Мюнхен, Германия, 1998)
4. Итало-Российский лазерный симпозиум (Москва, 1999)
5. Семинар "Оптические свойства микрорезонаторов" (Триест, Италия, 1998)

6. Международная конференция по квантовой электронике (Балтимор, США, 1999)
7. Мемориальный симпозиум памяти Н.И. Коротева (Санкт-Петербург, 1999)
8. Летняя школа по квантовой оптике (Бонн, Германия, 2000)
9. Ежегодное совещание “Сканирующая зондовая микроскопия” (Нижний Новгород, 2000)
10. Международная конференция по квантовой электронике (Сан-Франциско, США, 2000)
11. Международная конференция по лазерной физике (Бордо, Франция, 2000)
12. Европейская конференция по лазерам и электрооптике (Ницца, Франция, 2000)

## ОБЪЕМ И СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа состоит из введения, обзорной главы, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 160 страниц, включая 48 рисунков. Список литературы состоит из 150 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении показывается актуальность темы, формулируются цель и задачи исследования; рассматривается содержание диссертации по главам.

В первой главе содержится обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных созданию фотонных кристаллов и их использованию в лазерной физике и нелинейной оптике.

Во второй главе обзор существующих методов описания фотонных кристаллов совмещен с оригинальными результатами. Первый параграф посвящен изложению различных методов описания одномерных фотонных кристаллов. В первом пункте рассматривается модель бесконечной периодической слоистой структуры; исследуется аналитическое дисперсионное соотношение для этой структуры; на основе дисперсионного соотношения рассчитывается зонная структура уровней энергии. Во втором пункте в модель бесконечной периодической слоистой структуры вводится дефект – удаляется один из слоев. Приводится дисперсионное соотношение, определяющее спектр

дефектных уровней, рассчитывается распределение электрического поля вблизи дефекта. В третьем пункте излагаются только оригинальные результаты – модифицированным методом передаточных матриц описывается распространения коротких световых импульсов в слоистой структуре с конечным числом периодов. Производится расчет прохождения импульса через многослойную структуру для трех различных случаев: режима короткого импульса, режима длинного импульса, и промежуточного режима. Формулируются основные закономерности распространения светового импульса в каждом из случаев. В четвертом пункте кратко излагается метод расчета зонной структуры одномерного фотонного кристалла с произвольной модуляцией показателя преломления – метод плоских волн. В качестве примера рассчитывается дисперсионная кривая периодической слоистой структуры, проводится сравнение результата с аналитическим дисперсионным соотношением. В пятом пункте излагается метод численного интегрирования уравнений Максвелла (метод FDTD) для одномерной структуры с произвольной пространственной модуляцией показателя преломления, с частотной дисперсией и с квадратичной или кубической нелинейностью. Во втором параграфе 2-й главы приводятся два различных подхода к описанию двумерных фотонных кристаллов. В первом пункте излагается первый, называемый в литературе методом плоских волн и фактически являющийся обобщением теоремы Флоке на двумерный случай. Во втором пункте излагается применение метода FDTD для двумерных фотонных кристаллов, представляющего собой прямое интегрирование уравнений Максвелла в двух пространственных координатах и во времени. Излагается способ дискретизации уравнений Максвелла и постановка граничных условий. Рассчитывается зонная структура двумерного фотонного кристалла, образованного треугольной решеткой цилиндрических воздушных пор в диэлектрике. Затем излагается методика расчета оптических характеристик двумерного фотонного кристалла с конечным числом периодов. Приводится пример расчета спектра пропускания такой структуры.

Третья глава посвящена изложению оригинальных результатов, касающихся нелинейного взаимодействия сверхкоротких световых импульсов в одномерных фотонных кристаллах. В первом параграфе изучается возможность управления фазой и длительностью коротких лазерных импульсов с помощью

дисперсионных свойств фотонных кристаллов. Выполнены аналитические и численные исследования сжатия и фазовой модуляции импульсов в одномерных структурах с фотонными запрещенными зонами. Продемонстрирована возможность компрессии сверхкоротких импульсов в фотонных кристаллах с кубичной нелинейностью. В первом пункте излагаются метод медленно меняющихся амплитуд и приближение второго порядка теории дисперсии, используемые при интерпретации результатов численного расчета. На основании аналитического дисперсионного соотношения для слоистой структуры рассчитывается дисперсия групповой скорости, вводится понятие зоны компрессии. В рамках приближения медленно меняющихся амплитуд (ММА) и второго порядка теории дисперсии аналитически рассчитываются пространственные масштабы компрессии коротких световых импульсов длительностью в несколько оптических периодов в периодических слоистых структурах. Во втором пункте модифицированным методом передаточных матриц численно рассчитывается сжатие фазово-модулированных коротких световых импульсов в периодических слоистых структурах. Показано, что при соответствующем подборе параметров фотонного кристалла фазово-модулированные фемтосекундные световые импульсы испытывают сжатие до нескольких оптических периодов на пространственном масштабе менее миллиметра. Величины предельной длительности импульса и длины компрессии, полученные в рамках приближения ММА и второго порядка теории дисперсии, находятся в хорошем количественном согласии с результатами численного расчета. В третьем пункте методом FDTD численно рассчитывается эффективность компрессии световых импульсов в фотонных кристаллах с кубичной нелинейностью. Показано, что за счет сочетания фазовой самомодуляции и управления дисперсией фотонные кристаллы с кубичной нелинейностью позволяют реализовать сжатие спектрально-ограниченных сверхкоротких лазерных импульсов до длительностей, соответствующих нескольким периодам оптического поля (рис.1).

В четвертом пункте главы 3 обсуждаются предельные длительности импульса при компрессии в фотонных кристаллах. Минимальная длительность, до которой могут быть сжаты световые импульсы в ФЗЗ структурах, ограничена шириной спектрального диапазона, в котором обеспечивается дисперсия групповой скорости нужного знака, приводящая к компенсации chirp в случае

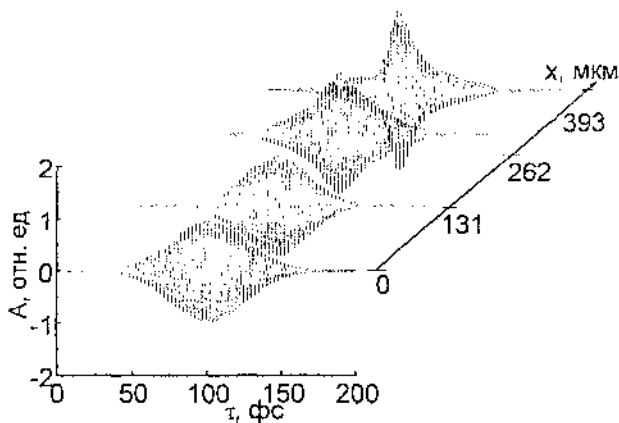


Рис. 1. Сжатие лазерного импульса с длиной волны 800 нм и длительностью 10 слетовых периодов в нелинейной слоистой ФЗЗ структуре со следующими параметрами: период структуры  $d = a + b = 438$  нм; толщина линейного слоя  $a$  равна толщине нелинейного слоя  $b$ ;  $\epsilon_{oa} = 1$ ;  $\epsilon_{ob} = 1.5$ ; нелинейная добавка к диэлектрической проницаемости  $\xi = \epsilon_{nl} E^2 = 0.002$ .

линейной ФЗЗ структуры либо к самосжатию импульса в нелинейной ФЗЗ среде. В пятом пункте проводится оптимизация материалов, составляющих фотонный кристалл для наиболее эффективной компрессии. Показано, что слоистые структуры с параметрами, близкими к тем, что получены экспериментально, позволяют реализовать компрессию фемтосекундных световых импульсов до длительностей в несколько оптических периодов на субмиллиметровой пространственной шкале. Во втором параграфе излагается метод синхронного преобразования частоты сверхкоротких лазерных импульсов в одномерных фотонных кристаллах. В первом пункте вводится приближение бесконечной слоистой структуры для описания процесса генерации второй гармоники в фотонных кристаллах. Во втором пункте в рамках этого приближения аналитически рассчитываются условия фазового и группового синхронизма, а также отсутствия дисперсии групповой скорости для структуры без материальной дисперсии. Показано, что в структуре, состоящей из чередующегося набора четвертьволновых и полуволновых пластинок без материальной дисперсии, одновременно выполняются условия фазового и группового синхронизма, а дисперсия групповой скорости равна нулю. В

третьем пункте описывается способ создания условий одновременного выполнения фазового и группового синхронизма в нелинейной среде с произвольным законом дисперсии за счет дисперсии фотоннокристаллической структуры. В заключительном пункте приводятся результаты численного моделирования методом FDTD преобразования во вторую гармонику в слоистой структуре с частотной дисперсией нелинейного слоя. Исследована зависимость эффективности преобразования во вторую гармонику от длины взаимодействия и длительности импульса. Рассчитано влияние отстройки несущей частоты преобразуемого импульса от частоты, на которой выполняются условия фазового и группового синхронизма на эффективность преобразования во вторую гармонику. Показано, что предложенный метод позволяет существенно повысить эффективность преобразования во вторую гармонику по сравнению не только с объемными преобразователями, но и с регулярными доменными структурами (рис. 2).

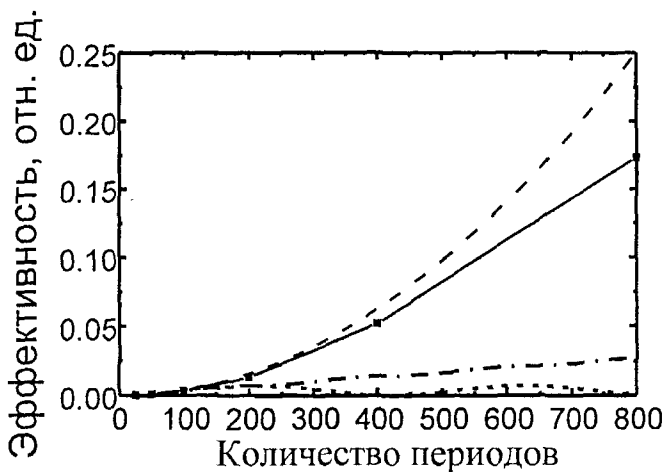


Рис. 2. Зависимость эффективности генерации второй гармоники от длины нелинейной среды (выраженной в количестве периодов ФЗЗ-структуры) для ФЗЗ-структуры (сплошная линия), регулярной доменной структуры (штрихпунктирная линия), нелинейной среды с нескомпенсированной фазовой и групповой расстройкой (пунктирная линия). При расчете всех кривых задавались одинаковые параметры светового излучения, величины нелинейности и дисперсии нелинейного материала. Штриховой линией показана квадратичная зависимость эффективности генерации от длины взаимодействия в отсутствие материальной дисперсии.

Это открывает широкие возможности достижения высоких эффективностей удвоения частоты за счет использования материалов с высокой нелинейностью, которые не могут быть использованы в обычных преобразователях из-за отсутствия синхронизма.

В четвертой главе исследуется локализация света в дефектных модах двумерных фотонных кристаллов. В первом параграфе приводится методика расчета распределения поля и спектра пропускания в ФЗЗ-структуре с дефектом решетки. Во втором параграфе рассчитывается спектр дефектных мод двумерного фотонного кристалла, образованного треугольной решеткой цилиндрических воздушных пор в кремнии. Дефект образован удалением одного из рядов пор, либо заполнением их веществом с отличным показателем преломления. Рассчитана зависимость спектра дефектных мод от показателя преломления дефекта (рис. 3).

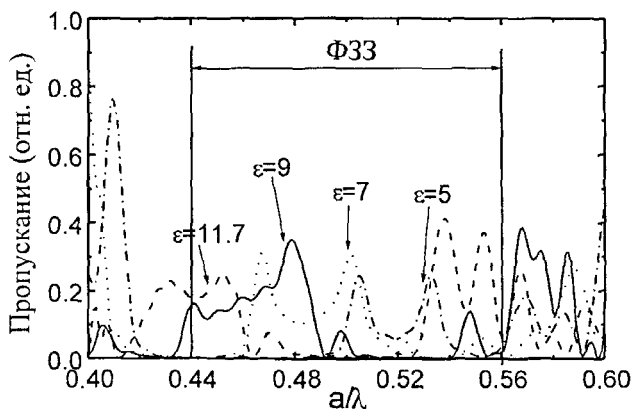


Рис. 3. Спектр дефектных мод двумерной ФЗЗ-структуры с треугольной симметрией решетки с периодом  $a$  для различных диэлектрических проницаемостей материала дефекта:  $\varepsilon = 11.7$  (штриховая линия), 9 (сплошная линия), 7 (пунктирная линия), 5 (штрих-пунктирная линия).

В третьем параграфе рассчитывается распределение интенсивности света вблизи дефекта. Показано, что электромагнитное излучение может быть локализовано в дефекте на пространственном масштабе менее длины волны. В четвертом параграфе исследуется характеристики ближнего поля двумерных фотонных кристаллов с дефектом решетки. Показано, что поле на выходе



фотонного кристалла с дефектом решетки обладает свойствами нерадиационной волны, локализовано вблизи поверхности фотонного кристалла и испытывает экспоненциальное затухание при удалении от кристалла (рис.4).

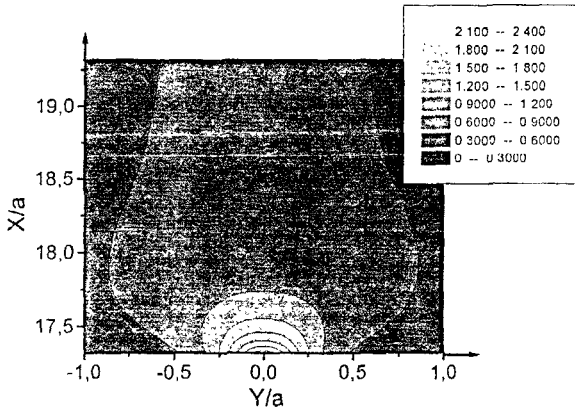


Рис. 4. Двумерная карта распределения среднего квадрата электрического поля  $\overline{E^2}$  над поверхностью ФЗЗ-структуры с дефектом решетки, для отношения  $a/\lambda = 0,454$ , где  $a$  – период решетки. Плоскость  $X=0$  совпадает с входной гранью кристалла, а плоскость  $X=17a$  совпадает с выходной гранью кристалла.

В заключительном параграфе обсуждаются способы использования высокой степени локализации поля в дефектных модах фотонных кристаллов в микроскопии ближнего поля, оптической памяти и других прикладных задачах.

В приложении 1 методика, развитая для описания слоистых структур, используется для расчета дисперсионных характеристик поверхностных электромагнитных волн на резкой границе плазмы, индуцированной мощными фемтосекундными лазерными импульсами.

В приложении 2 приводятся результаты экспериментов по созданию фотонных кристаллов методом двухфотонной фотополимеризации.

В заключении формулируются основные результаты диссертационной работы:

1. На основании выполненного анализа распределения электромагнитного поля в двумерных ФЗЗ-структурах с дефектом решетки и исследования

спектра дефектных мод в запрещенных зонах таких структур выявлен ряд важных свойств локализации поля в фотонных кристаллах:

- а) световое поле в этих условиях может быть локализовано в области размером менее длины волны;
- б) поле на выходе ФЗЗ-структуры с дефектом обладает свойствами нерадиационной волны. При этом достигается субдифракционное пространственное разрешение, а эффективность ввода излучения в дефектную моду может превышать 50%. Последние два обстоятельства указывают на перспективность применения фотонных кристаллов с дефектом в качестве зонда в микроскопии ближнего поля.
- в) присутствие на выходе из дефекта пробной диэлектрической сферы диаметром менее длины волны падающего излучения приводит к сильному возмущению пространственного распределения поля внутри ФЗЗ-структуры, что указывает на возможность внешнего управления распределением светового поля в дефектных модах фотонных кристаллов.
- г) рассчитан спектр дефектных мод фотонного кристалла с дефектом решетки и исследована зависимость этого спектра от параметров фотонного кристалла.

- 2. Разработаны способы расчета оптических характеристик фотонных кристаллов, а также распространения и нелинейных взаимодействий сверхкоротких световых импульсов и пучков в одномерных и двумерных фотонных кристаллах, основанные на прямом интегрировании во времени векторных уравнений Максвелла, в которых пространственные и временные производные аппроксимированы конечными разностями (метод FDTD). Данный метод не использует приближения медленно меняющихся амплитуд и является эффективным способом описания нелинейных взаимодействий сверхкоротких световых импульсов длительностью несколько периодов поля, и предельно жестко сфокусированных световых пучков.
- 3. Показано, что одномерные ФЗЗ структуры дают возможность управления фазой и сжатия импульсов на субмиллиметровой пространственной шкале. За счет сочетания фазовой самомодуляции и управления дисперсией ФЗЗ структур фотонные кристаллы с кубической

оптической нелинейностью позволяют реализовать сжатие сверхкоротких лазерных импульсов до длительностей, соответствующих нескольким периодам оптического поля. Минимальная длительность, до которой могут быть сжаты световые импульсы в ФЗЗ структурах, ограничены шириной спектрального диапазона на краю зоны компрессии, в которой обеспечивается дисперсия групповой скорости нужного знака, приводящая к компенсации чирпа в случае линейной ФЗЗ структуры либо к самосжатию импульса в нелинейной ФЗЗ среде.

4. Показано, что одномерные ФЗЗ структуры позволяют одновременно обеспечить условия фазового и группового синхронизма для процесса генерации второй гармоники с участием предельно коротких световых импульсов. Получены аналитические выражения для параметров ФЗЗ-структур, при которых одновременно выполняются условия фазового и группового синхронизма для процесса генерации второй гармоники. При выполнении данных условий оптические удвоители частоты на основе ФЗЗ-структур позволяют достичь увеличения эффективности преобразования по сравнению со структурами для квазисинхронных взаимодействий.

#### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. S.A.Magnitskii, V.T.Platonenko, A.V.Tarasishin, Surface Electromagnetic Waves at the Interface between Vacuum and Plasma produced by Ultrashort Laser Pulses.// *Laser Physics*, 1999, vol. 9, № 2, p. 514.
2. V.V. Aristov, S.A. Magnitskii, V.V. Starkov, A.V. Tarasishin, and A.M. Zheltikov, Silicon Photonic Band-Gap Structures Controlling Light Pulses and Beams.// *Laser Physics*, 1999, vol. 9, № 6, p. 1260.
3. R.A. Borisov, G.N. Dorojkina, N.I. Koroteev, V.M. Kozenkov, S.A. Magnitskii, D.V. Malakhov, A.V. Tarasishin, A.M. Zheltikov, Fabrication of three-dimensional periodic microstructures by means of two-photon polymerization.// *Appl. Phys. B*, 1998, vol. 67, p. 765.
4. А.М. Желтиков, Н.И. Коротеев, С.А. Магницкий, А.В. Тарасишин, Компрессия составных импульсов в фотонных кристаллах.// *Квантовая электроника* 1998, т. 25, № 10, с. 885.
5. N.I. Koroteev, S.A. Magnitskii, A.V. Tarasishin, A.M. Zheltikov, Compression of ultrashort light pulses in photonic crystals: when envelopes cease to be slow.// *Opt. Commun.* 1999, vol. 159, p. 191.

6. А.М. Желтиков, И.И. Коротеев, С.А. Магницкий, А.В. Тарасишин, Фазовая самомодуляция и компрессия световых импульсов в нелинейных фотонных кристаллах // Изв. Ком. Акад. Наук, сер. физ. 1999, т. 63, с. 717.
7. А.М. Желтиков, С.А. Магницкий, А.В. Тарасишин, Локализация и канализирование света // Письма ЖЭТФ 1999, т. 70, №5, с. 323.
8. S.A. Magnitskii, A.V. Tarasishin, A.M. Zheltikov, Near-field optics with photonic crystals // Appl. Phys. B 1999, vol. 69, p. 497.
9. А.М. Желтиков, С.А. Магницкий, А.В. Тарасишин, Двумерные фотонные кристаллы с дефектом решетки: спектр дефектных мод, локализация света и формирование нерадиационных волн // ЖЭТФ, 2000, т. 117, №4, с. 691.
10. А.В. Тарасишин, А.М. Желтиков, С.А. Магницкий, Синхронная генерация второй гармоники сверхкоротких лазерных импульсов в фотонных кристаллах // Письма ЖЭТФ, 1999, т. 70 №12, с. 819.
11. N.I. Koroteev, S.A. Magnitskii, A.V. Tarasishin, and A.M. Zheltikov, High-Density Three-Dimensional Optical Data Storage with Photonic Band-Gap Structures // Laser Physics, 1999, vol. 9, № 6, p. 1253.
12. S.A. Magnitskii, V.T. Platonenko, A.V. Tarasishin, Surface Electromagnetic Waves at the Interface between Vacuum and Plasma produced by Ultrashort Laser Pulses // International Conf Varenna, Italy, AIP Proc., 1997, vol. 426, p. 73.
13. R.A. Borisov, G.N. Dorozhkina, N.I. Koroteev, V.M. Kozenkov, S.A. Magnitskii, D.V. Malakhov, A.V. Tarasishin, and A.M. Zheltikov, Two-photon polymerization as a method for fabrication of three-dimensional periodic microstructures // Proc. SPIE, 1999, vol. 3734, p. 363-368.
14. R.A. Borisov, G.N. Dorozhkina, N.I. Koroteev, V.M. Kozenkov, S.A. Magnitskii, D.V. Malakhov, A.V. Tarasishin, A.M. Zheltikov, Femtosecond Two-Photon Photopolymerization: A Method to Fabricate Optical Photonic Crystals with Controllable Parameters // Laser Phys., 1998, vol. 8, № 5, p. 1105-1108.
15. N.I. Koroteev, S.A. Magnitskii, A.V. Tarasishin, and A.M. Zheltikov, Pulse Compression in Photonic Crystals // Proc. SPIE, 1999, vol. 3734, p. 373-380.
16. S.A. Magnitskii, V.T. Platonenko, A.V. Tarasishin, Dispersion relations and two-beam excitation of surface plasmon polaritons at the boundary of a plasma created by an intense ultrashort laser beam // Proc. SPIE, 1999, vol. 3735, p. 225-232.
17. V.V. Aristov, S.A. Magnitskii, V.V. Starkov, A.V. Tarasishin, A.M. Zheltikov Silicon Photonic Band-Gap Structures Controlling Light Pulses and Beams // Second Italian-Russian Symposium on Ultrafast Optical Physics (ITARUS'99), Technical Digest, Moscow, Russia, 1999, p. 80 - 82.
18. N.I. Koroteev, S.A. Magnitskii, A.V. Tarasishin, A.M. Zheltikov, Compression of Ultrashort Light Pulses in Photonic Crystals // Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS'99), Technical Digest, 1999, May 23 - 28, Baltimore, USA, p. 9.
19. S.A. Magnitskii, A.V. Tarasishin, A.M. Zheltikov, Near-field optics with photonic crystals // Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS'2000), Technical Digest, 2000, May 7 - 12, San Francisco, p. 71.
20. А. А. Ежов, С. А. Магницкий, Д. А. Музыченко, В. И. Панов, А. В. Тарасишин, Исследования локализации электромагнитного поля на периодических структурах и дефектах методом оптической микроскопии ближнего поля // Поверхность, 2000, № 11, с. 78.

21. A.V. Tarasishin, S.A. Magnitskii, V.A. Shuvaev, A.M. Zheltikov, Constructing a light-field distribution for the laser guiding of atoms in photonic crystals.// Opt. Comm., 2000, vol. 184, p. 391.
22. А.В. Тарасишин, А.М. Желтиков, С.А. Магницкий, В.А. Шуваев, Лазерное управление охлажденными атомами в фотонных кристаллах.// Квантовая электроника. 2000, т. 30, №9, с. 843.
23. М.В. Алфимов, А.М. Желтиков, А.А. Иванов, В.И. Белоглазов, Б.А. Кириллов, С.А. Магницкий, А.В. Тарасишин, А.Б. Федотов, Л.А. Мельников, Н.Б. Скибина, Фотонно-кристаллические волноводы с фотонной запрещенной зоной, перестраиваемой в области 930-1030 нм.// Письма ЖЭТФ, 2000, т. 71, №12, с. 714.
24. А.М. Желтиков, А.В. Тарасишин, С.А. Магницкий, Фазовый и групповой синхронизм при генерации второй гармоники сверхкоротких световых импульсов в фотонных кристаллах.// ЖЭТФ, 2000, т. 118, вып. 2 (8), с. 340.
25. А. А. Ежов, С. А. Магницкий, Д. А. Музыкаченко, В. И. Панов, А. В. Тарасишин, Исследования локализации электромагнитного поля на периодических структурах и дефектах методом оптической микроскопии ближнего поля.// Материалы совещания "Зондовая микроскопия - 2000", 28 февраля-2 марта 2000, Нижний Новгород, Россия, с. 137.
26. A.V. Tarasishin, S.A. Magnitskii, and A.M. Zheltikov, Light Channeling and Localization in Defect modes of Two-Dimensional Photonic Band-Gap Structures.// 2000 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (IQEC'2000), Technical Digest, 2000, September 10 - 15, Nice, France, p.21.
27. A.V. Tarasishin, S.A. Magnitskii, and A.M. Zheltikov, Laser Guiding of Atoms in Photonic Crystals.// 9th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'2000), Technical Digest, 2000, July 17 - 21, Bordeaux, France, p. 11.
28. A.V. Tarasishin, S.A. Magnitskii, and A.M. Zheltikov, Matching Phase and Group Velocities in Second-Harmonic Generation in One-Dimensional Photonic Band-Gap Structures.// 9th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'2000), Technical Digest, 2000, July 17 - 21, Bordeaux, France, p.38.
29. N.I. Korotceev, S.A. Magnitskii, A.V. Tarasishin, A.M. Zheltikov, Compression of ultrashort light pulses in photonic crystals: when envelopes cease to be slow.// German-Russian Laser Symposium, Technical Digest, 1998, October 7 - 10, Munich, Germany, p.17.