

На правах рукописи



Пихуля Денис Григорьевич

**ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ
ИЗ ИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА
ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ**

Специальность 01.04.07 — "Физика конденсированного состояния"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Челябинск
2015

Работа выполнена на кафедре оптики и спектроскопии ФГБОУ ВПО "Южно-Уральский государственный университет" (НИУ).

Научный руководитель — доктор физико-математических наук
Кундикова Наталия Дмитриевна.

Официальные оппоненты: Цветков Владимир Борисович,
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией активных сред твердотельных лазеров ФГБУН "Институт общей физики им. А.М. Прохорова" РАН.

Шур Владимир Яковлевич,
доктор физико-математических наук,
профессор ФГАОУ ВПО "Уральский Федеральный
Университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина".

Ведущая организация — Самарский филиал "Физического института им.
П.Н. Лебедева" РАН.

Защита состоится 17 июня 2015 г., в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.04 при ФГБОУ ВПО "Южно-Уральский государственный университет" (НИУ) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО "Южно-Уральский государственный университет" (НИУ), а также по адресу:
<http://www.susu.ac.ru/ru/dissertation/d-21229804/pihulya-denis-grigorevich>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу диссертационного совета на имя ученого секретаря.

Автореферат разослан _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета кандидат физико-математических наук



С.И. Морозов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её проработки.

Появление фотонных кристаллов совершило переворот в современной оптике. Фотонные кристаллы — трехмерные периодические структуры из диэлектрика с разным показателем преломления с периодом порядка длины волны света. При отражении света от границ раздела сред с разными показателями преломления происходит сложение волн, что приводит к появлению диапазона частот излучения, в котором возможно полное отражение. Такой диапазон называется запрещенной зоной в зонной структуре фотонного кристалла. Свойства фотонных кристаллов по отношению к свету похожи на свойства полупроводников по отношению к электронам и описываются в сходных терминах.

Наличие запрещенной зоны открывает широкие возможности использования фотонных кристаллов в различных оптических приборах. Это микрорезонаторы (лазеры) — фотонно-кристаллические структуры с внедренным дефектом активной среды, оптические волокна и различные преобразователи для волоконной оптики. Использование фотонных кристаллов поднимает на качественно новый уровень интегральную оптику и приводит к возможности создания полностью оптических вычислительных микрочипов.

Явления нелинейной оптики при использовании фотонных кристаллов могут быть многократно усилены благодаря уникальной способности фотонных кристаллов локализовать на дефектах свет определенной длины волны. Дисперсионные соотношения для сильно отличающихся длин волн могут быть сделаны равными благодаря периодической структуре и аномальной дисперсии на границе запрещенной зоны. При попадании длины волны за пределы запрещенной зоны¹ возможно согласование скоростей распространения волн с основной ω и удвоенной 2ω частотой, что приводит к резкому увеличению эффективности генерации второй гармоники в нелинейном материале.

Генерация второй гармоники (явление удвоения частоты лазерного излучения) имеет огромное практическое значение как основной способ получения новых длин волн когерентного излучения высокой мощности в видимой области спектра. Как известно, для осуществления удвоения частоты необходима высокая пи-

¹P. P. Markowicz, H. Tiryaki, H. Pudavar, P. N. Prasad, N. N. Lepeshkin, R. W. Boyd, *Phys. Rev. Lett.*, 2004, №92, P. 083903.

ковая мощность излучения, наличие у среды восприимчивости второго порядка $\chi^{(2)}$ и выполнение условия фазового синхронизма, заключающегося в равенстве скоростей распространения волн с частотами ω и 2ω .

В фотонных кристаллах в отличие от кристаллических материалов, как указывалось выше, легко реализовать равенство скоростей распространения излучения с частотами ω и 2ω . В тоже время фотонные кристаллы, как правило, изготавливаются из аморфного материала, в котором $\chi^{(2)} = 0$ из соображений симметрии. Однако, в 1981 году впервые наблюдалась генерация второй гармоники в оптическом волокне, изготовленном из германо-силикатного стекла². Выявление причин генерации второй гармоники в волокне привело к развитию нового направления исследований фотоиндуцированной генерации второй гармоники в аморфных материалах, в том числе и в стеклах.

В свинцово-фосфатных стеклах, активно исследуемых в лаборатории нелинейной оптики института электрофизики УрО РАН, обнаружена высокая эффективность преобразования излучения во вторую гармонику, однако открытыми остаются вопросы о микроскопическом механизме этого явления и о дальнейшем повышении эффективности генерации.

Таким образом, фотонные кристаллы, изготовленные из свинцово-фосфатного стекла, могут оказаться перспективной средой для генерации второй гармоники.

Для создания эффективного удвоителя частоты на основе фотонного кристалла из стекла, способного к фотоиндуцированной генерации второй гармоники, необходимо провести выбор стекла и исследовать его свойства, а также свойства фотоннокристаллической структуры, обладающей полной запрещенной зоной при показателе преломления выбранного стекла. Поскольку типичное значение показателя преломления стекол лежат в интервале от 1,4 до 1,7, а фотоннокристаллических структур, обладающих запрещенной зоной при таком низком контрасте до сих пор не найдено, актуальной становится задача поиска таких структур и разработка методов их получения.

Сказанное выше определяет актуальность представленной работы.

Целью работы явилось исследование возможности создания фотоннокристаллического изотропного материала для генерации второй гармоники в видимой области спектра.

²Sasaki Y., Ohmori Y. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, v.39, n.6, p.466-468.

В соответствии с поставленной целью определены задачи диссертации:

- 1) Найти фотоннокристаллические структуры, имеющие низкий порог существования запрещенной зоны по показателю преломления.
- 2) Разработать методы понижения порога существования запрещенной зоны по показателю преломления в фотонных кристаллах.
- 3) Исследовать возможность создания материала на основе свинцово-фосфатных стекол, обладающего высоким коэффициентом преобразования излучения во вторую гармонику.
- 4) Исследовать эффективность генерации второй гармоники в одномерном фотонном кристалле, состоящем из четвертьволновых слоев материала, способного к фотоиндуцированной генерации второй гармоники.

Научная новизна. Впервые определены условия существования запрещенных зон фотонных кристаллов, получаемых методом двухволновой интерференционной литографии.

Впервые определены пороги существования запрещенных зон по показателю преломления n_{th} , фактору заполнения диэлектриком f и углу между базисными векторами решетки θ . Обнаружено, что наименьшее значение n_{th} для зоны 2-3 ГЦК решетки составляет $n_{th} = 2,5$ при оптимальном $f = 36\%$. Для зоны 7-8 при том же типе решетки пороговая величина показателя преломления принимает значение $n_{th} = 3$ при оптимальном $f = 23\%$. Для простой кубической решетки пороговый контраст выше, чем у ГЦК решетки: $n_{th} = 3$ при оптимальном $f = 32\%$, однако при больших показателях преломления материала этот тип решетки является предпочтительным, поскольку ширина запрещенной зоны у простой кубической решетки оказывается больше. Обнаружено, что при $n = 3,45$ и оптимальном факторе заполнения диэлектриком ширина запрещенной зоны у простой кубической решетки равна $11,4\%$, а у ГЦК решетки для зоны 2-3 она составляет $5,8\%$.

Впервые показано, что максимальная величина запрещенной зоны 2-3 в координатах f и θ достигается при показателе преломления $n_{th} = 2,14$ для симметрии, отличной от симметрии ГЦК решетки.

Впервые предложен и реализован метод на основе генетического алгоритма для определения оптимального положения „атомов“ фиксированной формы в решетке фотонного кристалла. Проведены расчеты по оптимизации положения 2,

3, 4 и 5 атомов в ГЦК ячейке фотонного кристалла для максимизации ширины запрещенной зоны 2-3. Установлено, что оптимальной структурой, состоящей из двух диэлектрических „атомов“, является алмазная решетка. Впервые обнаружены новые структуры фотонных кристаллов, состоящих из более чем двух „атомов“, упакованных в ГЦК решетку. При оптимизации структуры, состоящей из трех „атомов“ получена запрещенная зона размером 7,7%. При оптимизации структуры, состоящей из четырех „атомов“ получена запрещенная зона размером 9,4%. При оптимизации структуры, состоящей из пяти „атомов“ получена запрещенная зона размером 9,9%.

Впервые определена зависимость динамических характеристик свинцово-фосфатных стекол от температуры. Показано, что добавление церия в матрицу свинцово-фосфатного стекла повышает порог пробоя материала, увеличивает эффективность генерации второй гармоники, значительно увеличивает характерное время жизни наведенной $\chi^{(2)}$ -нелинейности, усиливает зависимость характерного времени жизни $\chi^{(2)}$ -нелинейности от температуры, о чем свидетельствует увеличение температурного коэффициента активации носителей заряда в 2,3 раза.

Впервые исследовано влияние кубической оптической нелинейности на генерацию второй гармоники в свинцово-фосфатных стеклах. Установлено, что повышение эффективности генерации второй гармоники в свинцово-фосфатных стеклах при увеличении концентрации метафосфата свинца связано с ростом амплитуды поля пространственного заряда.

Впервые теоретически продемонстрирована возможность генерации второй гармоники в одномерном фотонном кристалле, состоящем из четвертьволновых слоев материала, способного на фотоиндуцированную генерацию второй гармоники. Получена эффективность генерации $10^{-3}\%$.

Теоретическая и практическая значимость работы. Работа развивает теоретические методики синтеза фотонных кристаллов с заданными свойствами на основе генетических алгоритмов.

В работе детально исследован весь спектр фотонных кристаллов, которые могут быть получены методом двухволновой интерференционной литографии при трехкратном экспонировании. Полученные данные позволяют проектировать

установки для получения фотонных кристаллов исходя из требуемых свойств на выходе.

Полученные результаты могут быть использованы для создания нелинейных фотонно-кристаллических структур с фазовым синхронизмом в широком диапазоне длин волн, что открывает широкие возможности построения преобразователей оптических гармоник. Это позволит расширить спектр лазерных излучателей на недоступные ранее диапазоны длин волн, что может быть востребовано в лазерной промышленности и сопутствующих отраслях.

Методология и методы исследования. В теоретической части работы использованы: метод разложения на плоские волны для решения волнового уравнения, метод конечных разностей для решения волнового уравнения, непрерывный генетический алгоритм оптимизации. В экспериментальной части работы использованы стандартные методы проведения эксперимента по генерации второй гармоники, развитые в лаборатории нелинейной оптики.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Минимальный порог существования зоны по показателю преломления в структурах, получаемых методом двухволновой интерференционной литографии, равен 2,14, а максимальная величина запрещенной зоны 2-3 в координатах f и θ достигается для симметрии, отличной от ГЦК.
2. Среди структур, состоящих из двух шариков, упакованных в ГЦК решетку, максимальной запрещенной зоной обладает структура с симметрией алмаза. Ширина запрещенной зоны составляет 10 % при факторе заполнения 35 % и показателе преломления 3,45.
3. Допирование свинцово-фосфатных стекол ионами церия приводит к увеличению температурного коэффициента активации носителей заряда в 2,3 раза.
4. Увеличение эффективности генерации второй гармоники в свинцово-фосфатных стеклах с ростом концентрации метафосфата свинца связано с ростом величины локального заряда.
5. Эффективность генерации второй гармоники в одномерных фотонных кристаллах, состоящих из четвертьволновых слоев материала, способного к наведению квадратичной нелинейности, составляет $10^{-3}\%$.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных теоретических результатов гарантируется большим количеством тестовых расчетов известных из литературы структур фотонных кристаллов. Достоверность экспериментальных результатов гарантируется большим количеством проведенных измерений.

Материалы диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: конференциях молодых ученых института Электрофизики УрО РАН (2002, 2003, 2005, 2013, Екатеринбург); международной конференции молодых ученых и специалистов „Оптика-2003“ (20–23 октября 2003, Санкт-Петербург); научном семинаре „Параллельные вычислительные технологии“ (3 февраля 2005, Челябинск); научном семинаре „Параллельные вычислительные технологии“ (26 января 2006, Челябинск); международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам „Ломоносов-2005“ (13–17 апреля, Москва); четвертой международной конференции молодых ученых и специалистов „Оптика-2005“ (17–21 октября 2005, Санкт-Петербург); научно-практической конференции „Нанотехнологии-2006“ (2006, Челябинск); международной научной конференции „Параллельные вычислительные технологии“ (29 января – 2 февраля 2007, Челябинск); пятой международной конференции молодых ученых и специалистов „Оптика-2007“ (15–19 октября 2007, Санкт-Петербург); VI Международной конференции „Фундаментальные проблемы оптики“ „ФПО-2010“ (18–22 октября 2010, Санкт-Петербург); международной конференции SPIE LASE (21 января 2012, Сан-Франциско, Калифорния, США); международной конференции „Оптика-2013“ (18–22 октября 2013, Санкт-Петербург).

Личный вклад автора. Работа выполнена лично автором или при его непосредственном участии. Экспериментальные исследования генерации второй гармоники в стеклах, теоретические исследования метода двухволновой интерференционной литографии, оптимизация структуры фотонных кристаллов с помощью генетического алгоритма выполнены автором лично. Теоретическое исследование генерации второй гармоники в одномерном фотонном кристалле выполнялось при непосредственном участии автора.

Основные результаты диссертации изложены в 12 публикациях, 4 из которых – в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 157 наименований цитируемой литературы. Полный объем диссертации — 125 страниц, включая 20 рисунков и 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи, указана научная новизна, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена исследованию свойств фотонных кристаллов, получаемых методом двухволновой интерференционной литографии, оптимизации структуры фотонных кристаллов. Проводится обзор литературы по тематике фотонных кристаллов, рассматривается история развития области и основная проблематика. Приведены методы изготовления фотонных кристаллов, проводится сравнительный анализ, указываются преимущества и недостатки различных методов. Наиболее перспективным методом признается метод голографической литографии³, который дает высокую воспроизводимость результатов и позволяет производить бездефектные решетки больших размеров. Наиболее передовым направлением в голографической литографии фотонных кристаллов является метод двухволнового многократного экспонирования⁴. Этот метод позволяет получать широкий класс структур и свободен он недостатка зонтиковой схемы³. Рассматриваются возможные области применения фотонных кристаллов. Наиболее многообещающие — фотонно-кристаллические волокна, управление спонтанным излучением, фотонно-кристаллические лазеры, управление нелинейными процессами. Подробно разобран метод расчета зонной структуры фотонных кристаллов с помощью разложения на плоские волны с использованием теоремы Блоха. Указанный метод лежит в основе программы `mpb`⁵, используемой в диссертации. Приводятся методы разработки структур фотонных кристаллов с наперед заданными свой-

³M. Campbell, D.N. Sharp, M.T. Harrison, R.G. Denning, A.J. Turberfield, *Nature*, 2000, N. 404, P. 53.

⁴C.K. Ullal, M. Maldovan, E.L. Thomas, G. Chen, Y.-J. Han, S. Yang, *Appl. Phys. Lett.*, 2004, V. 84, P. 5434.

⁵S.G. Johnson, J.D. Joannopoulos *Optics Express*, V. 8, N. 3, P. 173-190.

ствами, такими, как ширина запрещенной зоны. Эти методы позволяют улучшить ранее известные структуры, либо синтезировать новые. Наиболее распространенным методом для создания новых структур является генетический алгоритм оптимизации. Рассматривается теория генетических алгоритмов оптимизации, как метода определения экстремумов функций со сложной топологией пространства поиска.

Приведены результаты исследования зонной структуры трехмерных фотонных кристаллов, которые могут быть получены при помощи интерференционной литографии при трехкратном экспонировании фоторезиста двумя когерентными пучками.

В случае синтеза кристаллов этим методом вектор каждой решетки интенсивности, равный разности волновых векторов интерферирующих волн, равен одному из базисных векторов обратной решетки фотонного кристалла. Рассматривались случаи, соответствующие одинаковому углу между парами интерферирующих волн, т.е. все три базисных вектора обратных решеток имеют одинаковую длину.

Трехмерное периодическое распределение диэлектрика задавалось следующим образом. В результате интерференции нескольких лучей возникает некоторое распределение интенсивности $I(\vec{r})$ (или поглощенной плотности энергии излучения лазера). В области значений координат \vec{r} , соответствующих значениям интенсивности, которые больше некоторого порогового значения

$$I(\vec{r}) > I_{\text{th}}, \quad (1)$$

диэлектрическая проницаемость равна некоторой постоянной величине $\varepsilon_b > 1$, определяемой материалом решетки. Остальная часть пространства заполнена воздухом, т.е. диэлектрическая проницаемость равна единице $\varepsilon_a = 1$.

Углы между векторами обратной решетки \vec{b}_i принимаются равными. Так как модули этих векторов также равны между собой, то решетка является тригональной. Угол θ , который каждый из векторов \vec{b}_i составлял с направлением $\vec{b}_1 + \vec{b}_2 + \vec{b}_3$, варьировался в пределах от 25 до 80 градусов. Значения угла θ , равные 54,7, 70,5 и 35,3 градусов, соответствуют простой кубической (ПК), гранецентрированной кубической (ГЦК) и объемно-центрированной кубической (ОЦК) решеткам.

Для вычисления зонной структуры использовалась программа `mpb`⁶. При вычислениях учитывался векторный характер электромагнитного поля.

Проведена оптимизации геометрии экспонирования и определены оптимальные условия для получения максимальной запрещенной зоны при различных показателях преломления материала решетки. Результаты расчета представлены на рис. 1, изображающем линии уровня ширины запрещенных зон. Порог возникновения запрещенной зоны при данном методе синтеза структуры по показателю преломления материала решетки оказался равным $n_{th} = 2,14$, что весьма близко к рекордным значениям (алмазная решетка $n_{th} = 1,9$). Рассмотрен непрерывный переход между простой, гранецентрированной и объемно-центрированной кубическими решетками. Показано, что для всех зон оптимальный угол (или оптимальная симметрия решетки) практически не зависит от показателя преломления материала. Показано, что вплоть до $n_{th} = 3,45$ наблюдается рост размера зоны с ростом показателя преломления, насыщение этого роста не происходит. Наиболее устойчивой по отношению к отклонению симметрии решетки от оптимальной симметрии является зона 5-6, соответствующая простой кубической решетке.

Рассмотрен предложенный метод оптимизации структуры фотонных кристаллов с использованием генетического алгоритма. Метод используется для поиска положения диэлектрических шариков в ГЦК ячейке фотонного кристалла, оптимального для максимизации ширины запрещенной зоны.

Рассмотрим работу алгоритма на примере 2-х атомов в ячейке. Положение первого атома фиксировалось в начале координат $(0, 0, 0)$. Координаты второго „атома“ („особи“) могли принимать значения $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq z \leq 1$ в базисе ГЦК решетки. Случайным образом задавалось множество положений второго атома ("популяция"), состоящее из 10 положений ("особей").

В качестве оптимизируемой функции использовалась величина запрещенной зоны между второй и третьей зонами, для вычисления которой использовалась программа `mpb`⁷. Так как симметрия конфигурации диэлектрика в ячейке фотонного кристалла во время оптимизации ничем не ограничивалась, и отличалась от симметрии кристаллической решетки, потребовался учет всех характерных точек на поверхности зоны Бриллюэна. Значения частот рассчитывались во всех направлениях волнового вектора, совпадающих с вершинами, серединами граней и

⁶S.G. Johnson, J.D. Joannopoulos *Optics Express*, V. 8, N. 3, P. 173-190 .

⁷S.G. Johnson, J.D. Joannopoulos *Optics Express*, V. 8, N. 3, P. 173-190.

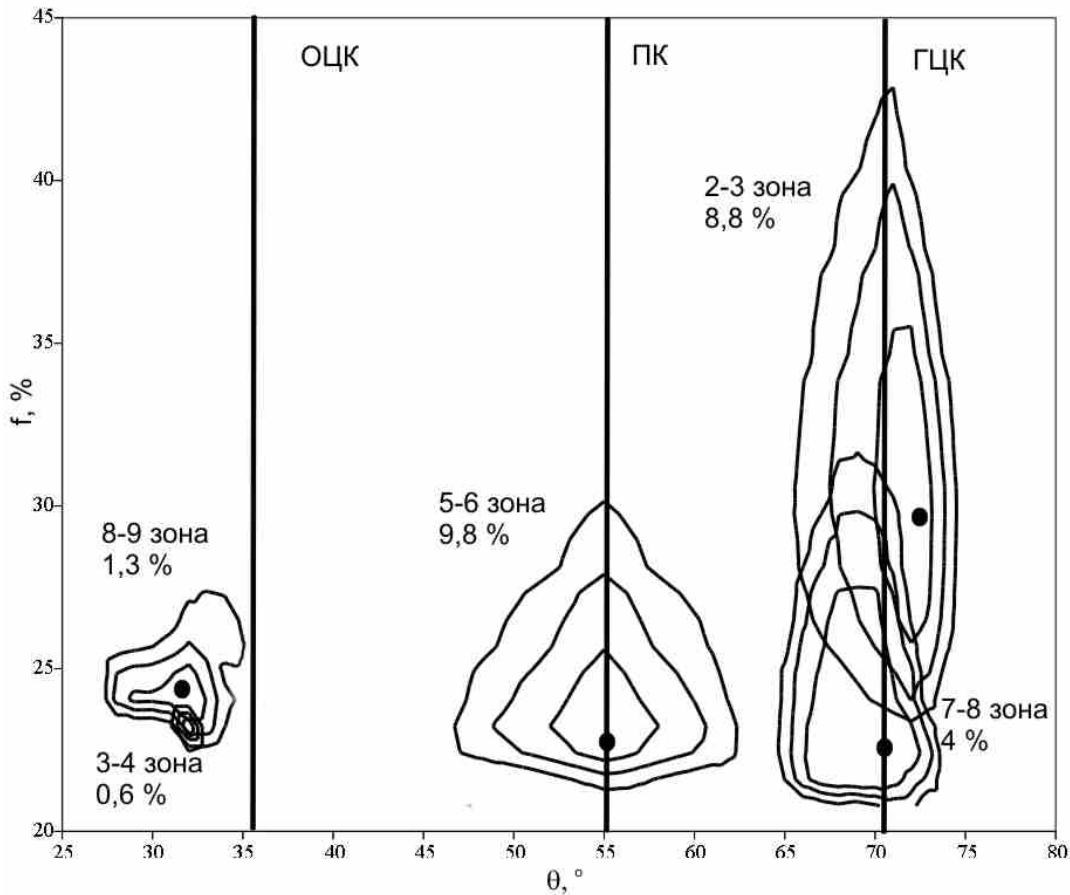


Рис. 1. Области существования запрещенных зон в фотонных кристаллах, получаемых методом двухволновой интерференционной литографии, при различных углах между базисными векторами θ и факторах заполнения f . Показатель преломления $n = 3,35$

серединами ребер зоны Бриллюэна. Общее число таких точек, включая начало координат, составило 75.

Для каждого элемента выбранного множества проводилось вычисление ширины запрещенной зоны. Затем выбранное множество положений разбивалось на два случайных подмножества. Из каждого подмножества проводилась выборка положений второго атома, которые давали в данном подмножестве максимальную ширину запрещенной зоны („селекция“). Далее выполнялась процедура „скрещивания“, которая заключалась в том, что из двух выбранных положений атома конструировалось третье положение. Координата нового состояния вычислялась как случайная величина из отрезка, ограниченного координатами выбранных положений.

Затем координаты полученного нового состояния с 50% вероятностью изменялись на случайную величину из диапазона координат, ограничивающих ячейку.

Для нового состояния определялась ширина запрещенной зоны, после чего из набора положений выбиралось положение с минимальной шириной запрещенной зоны, которое выбрасывалось из множества, не зависимо от того, принадлежало ли это положение первоначальному множеству или было получено в результате модификации положения двух атомов. Исключение одного положения обеспечивало постоянство элементов в множестве („особей“ в „популяции“).

Далее процесс повторялся до тех пор, пока все состояния во множестве становились неотличимы между собой с точностью до некоторой заданной величины, которая определяла точность вычислений. Любое из состояний полученного таким образом множества являлось решением задачи оптимизации.

Решение задач о расположении более двух атомов выполнялось аналогичным образом. Количество чисел n , описывающих положение „атомов“ в ячейке, определялось формулой $n = 3 \cdot (m - 1)$, где m – количество „атомов“ в ячейке.

Рассмотрены случаи оптимизации положения 2, 3, 4 и 5 шариков. Во всех случаях получены структуры, обладающие полной запрещенной зоной.

В главе 2 изложены результаты экспериментального исследования генерации второй гармоники в свинцово-фосфатных стеклах.

Проведен анализ современных методов исследования генерации второй гармоники в стеклах. Рассмотрены как методы прямого измерения, так и методы исследования микроскопических изменений материала при возникновении голограммы квадратичной восприимчивости. Приведены методы приготовления стекол для генерации второй гармоники. Сюда относятся как метод записи решетки квадратичной восприимчивости волнами излучения основной частоты и второй гармоники — фотоиндуцированная генерация, так и методы основанные на применении внешних статических полей. Рассмотрены составы стекол, исследованных в ходе развития направления генерации второй гармоники, одними из перспективных выделены свинцово-фосфатные стекла. Подробно рассмотрены работы, посвященные исследованию свинцово-фосфатных стекол как среды для фотоиндуцированной генерации второй гармоники.

Рассмотрены результаты исследования влияния температуры на динамические характеристики $\chi^{(2)}$ -голограмм. Для проведения исследования создана экспериментальная установка по исследованию генерации второй гармоники. Проведена запись и исследование распада решеток квадратичной восприимчивости в

свинцово-фосфатных стеклах различных составов при различных температурах. Обнаружено увеличение времени распада решеток квадратичной нелинейности при возрастании температуры образца.

В экспериментальных исследованиях использовались изготовленные в Государственном оптическом институте им. Вавилова два образца стекла разных составов: АГ-91 — 15 мол. % PbO и 50 мол. % P₂O₅; ФСЦ-3 — 16,1 мол. % PbO, 1,5 мол. % CeO₂ и 50 мол. % P₂O₅. Как показали ранние исследования⁸, основным компонентом, определяющим свойства этих стекол, является PbO.

Образцы представляли из себя пластинки толщиной около 8 мм с параллельными полированными гранями. Исследования проводились при температурах, при которых распад проходил достаточно быстро (несколько часов), но в то же время не слишком высоких, препятствующих записи решеток. Образцы закреплялись в специальный термостабилизированный держатель и нагревались до требуемой температуры в течение нескольких часов. Затем проводилась запись $\chi^{(2)}$ -голограммы, которая заключалась в продолжительном освещении сфокусированным в объем образца излучением основной частоты лазера и его второй гармоникой (затравкой). Экспонирование проводилось до насыщения, то есть до тех пор, пока сигнал генерируемой стеклом второй гармоникой не переставал возрастать. Мощность записывающего излучения подбиралась ниже порога пробоя образца при максимальной температуре, используемой в эксперименте. Мощность излучения затравки составляла около 1 % от мощности излучения на основной частоте. Записывающие пучки фокусировались микрообъективом вглубь образца на 1 мм от передней грани. Фокусное расстояние микрообъектива подбиралось таким образом, чтобы не только обеспечить максимально возможную плотность мощности в области фокальной перетяжки (радиус перетяжки составил 3 мкм), но и достичь максимальной степени перекрытия перетяжек пучков в условиях дисперсии. При этом на длину фокальной перетяжки (длину $\chi^{(2)}$ -голограммы), которая составила 30 мкм, укладывалось несколько периодов распределения пространственного заряда, обусловленных разностью фаз записывающих волн, вызванной дисперсией в материале образца.

После записи наблюдался процесс темнового распада $\chi^{(2)}$ -голограммы, обусловленный тепловой релаксацией упорядоченного объемного заряда. Указанный

⁸V.M. Churikov, A.I. Valeyev, K.O. Schavelev, O.S. Schavelev, *Optical Materials*, 2002, v. 19, p. 415-419.

процесс протекал в условиях постоянной температуры. Распад фиксировался при кратковременном (1-3 импульса) считывании $\chi^{(2)}$ -голограммы, то есть при облучении ее основной частотой лазера и наблюдении сигнала второй гармоники, генерируемой в образце.

В ходе проведенных исследований обнаружено увеличение времени распада решеток квадратичной нелинейности при возрастании температуры образца.

Показано, стекла АГ-91 и ФСЦ-3 ведут себя как полупроводники, так как их зависимость электропроводности от температуры может быть описана выражением:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{-E_a}{kT}},$$

где E_a — энергия активации носителей заряда. Несложные расчеты показали, что $E_{a-91} = 0,62$ эВ, $E_{a-3} = 1,4$ эВ. Сравнивая полученные значения энергий активации носителей заряда, а также полученные графические зависимости, можно сделать вывод о том, что добавление небольшого количества церия в матрицу свинцово-фосфатного стекла

- повышает порог пробоя материала,
- увеличивает эффективность генерации второй гармоники,
- значительно увеличивает характерное время жизни наведенной $\chi^{(2)}$ -нелинейности,
- усиливает зависимость характерного времени жизни $\chi^{(2)}$ -нелинейности от температуры.

Представлены результаты исследования кубической нелинейности в свинцово-фосфатных стеклах. Теория генерации второй гармоники утверждает, что квадратичная оптическая нелинейность $\chi^{(2)}$ образуется в результате воздействия статического поля пространственно разделенного заряда на кубическую нелинейность среды $\chi^{(3)}$:

$$\chi^{(2)} \sim \chi^{(3)} E_{dc}.$$

Как видно из этого выражения, эффективность генерации второй гармоники выше в тех материалах, где величина $\chi^{(3)}$ больше. По этой причине практический интерес представляет измерение кубической нелинейности стекол, что позволит сделать вывод о влиянии составов на их нелинейно-оптические свойства.

Измерение кубической оптической нелинейности $\chi^{(3)}$ проводилось методом генерации третьей гармоники на границе раздела воздух-стекло. С помощью короткофокусной линзы пучок фокусировался на передней грани образца. Предварительно была подобрана максимальная плотность мощности излучения, не вызывающая пробоя образцов. Для точного попадания перетяжки на переднюю грань применялась микроподвижка. Осуществлялось перемещение изучаемого образца навстречу пучку до получения максимальной генерации третьей гармоники. На выходе из образца излучение собирающей линзой фокусировалось в ФЭУ, подключенный к осциллографу. Ультрафиолетовым светофильтром третья гармоника отделялась от ИК излучения. Также с помощью спектрофотометра были проведены исследования коэффициентов пропускания исследуемых в эксперименте материалов на длине волны третьей гармоники неодимового лазера 355 нм.

В ходе проведения эксперимента было показано, что зависимость компонент эффективной $\chi^{(3)}$ -нелинейности от концентрации метафосфата свинца имеют максимум. Сравнение этих результатов с результатами работы⁹, в которой продемонстрирован монотонный рост эффективности генерации второй гармоники при увеличении содержания свинца в образцах, позволяет сделать вывод, что состав образцов оказывает сложное и неоднозначное влияние на нелинейно-оптические свойства: на изменение кубической нелинейности с одной стороны, и на величину поля насыщения объемного заряда с другой.

В главе 3 изложены результаты теоретического исследования генерации второй гармоники в одномерном фотонном кристалле, состоящем из четвертьволновых слоев материала, способного к фотоиндуцированной генерации второй гармоники.

Проводится обзор литературы в области генерации второй гармоники в фотонных кристаллах. Рассматриваются два подхода к этой проблеме: использование фотонных кристаллов для выравнивания групповых скоростей распространения волн основной и удвоенной частот и генерация второй гармоники на неоднородности диэлектрика.

В пакете МЕЕР¹⁰ проведено моделирование распространения излучения неодимового лазера и его второй гармоники в одномерном фотонном кристалле, состо-

⁹V.M. Churikov, A.I. Valeyev, K.O. Schavelev, O.S. Schavelev, *Optical Materials*, 2002, v. 19, p. 415-419.

¹⁰Ardavan F. Oskooi, David Roundy, Mihai Ibanescu, Peter Bermel, J. D. Joannopoulos, and Steven G. Johnson. *Computer Physics Communications*, (181):687–702, 2010.

ящем из четвертьволновых слоев материала, способного к фотоиндуцированной генерации второй гармоники, разделенных воздушными промежутками. Толщины слоев составляли четверть волны неодимового лазера. Промоделирована запись решетки квадратичной нелинейности, согласно выражению¹¹

$$\delta\chi^{(2)}(R) = \alpha E_{2\omega}(R)E_{\omega}^*(R)E_{\omega}^*(R).$$

Промоделировано распространение света через структуру фотонного кристалла с наведенной нелинейностью. Получена генерация второй гармоники с эффективностью $10^{-3}\%$.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Показано, что минимальный порог существования зоны по показателю преломления в структурах, получаемых методом двухволновой интерференционной литографии, равен 2,14, а максимальная величина запрещенной зоны 2-3 в координатах f и θ , равная 10 %, достигается для симметрии, отличной от ГЦК.

2. Показано, что среди структур, состоящих из двух шариков, упакованных в ГЦК решетку, максимальной запрещенной зоной обладает структура с симметрией алмаза. Ширина запрещенной зоны составляет 10 % при факторе заполнения 35 % и показателе преломления 3,45. Обнаружены новые структуры фотонных кристаллов, состоящих из 3, 4, 5 „атомов“, упакованных в ГЦК решетку. Ширина запрещенных зон новых структур составила 7,7 %, 9,4 % и 9,9 % соответственно.

3. Показано, что увеличение эффективности генерации второй гармоники, обусловленное ростом величины локального заряда, достигается увеличением концентрации метафосфата свинца. Эффективность генерации второй гармоники также увеличивается с ростом концентрации ионов церия, однако одновременно ухудшается термостабильность наведенной квадратичной нелинейности в свинцово-фосфатных стеклах.

4. Теоретически показана возможность эффективной фотоиндуцированной генерации второй гармоники в одномерных фотонных кристаллах, состоящих из четвертьволновых слоев материала, способного к наведению квадратичной нелинейности. Эффективность генерации составила $10^{-3}\%$.

Публикации автора в изданиях, рекомендованных ВАК.

¹¹Н. Б. Баранова and Б. Я. Зельдович. *Письма в ЖЭТФ*, 45(1):562–565, 1987.

1) Пихуля, Д.Г. Зонные структуры трехмерных фотонных кристаллов, получаемых методом интерференционной литографии / Д.Г. Пихуля, Ю.В. Микляев // Известия РАН. Серия физическая, 2006, т.70, 9, С. 1272–1274.

2) Герасимов, А.М. Эффективность генерации второй гармоники в одномерном фотонном кристалле из изотропного материала / А. М. Герасимов, Н. Д. Кундикова, Ю. В. Микляев, Д. Г. Пихуля, М. В. Терпугов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2013 – № 5(2), С. 147–150.

3) Kundikova, N.D. Rhombohedral photonic crystals by triple-exposure interference lithography: Complete photonic band gap / Nataliya D Kundikova, Yuri V Miklyaev, and Denis G Pikhulya // Optics Communications – 2012 – № 285(6), P. 1238–1241.

4) Gerasimov, A.M. Conversion efficiency of second harmonic generation in onedimensional photonic crystal based from isotropic material / A.M. Gerasimov, N.D. Kundikova, Yu.V. Miklyaev, D.G. Pikhulya, M.V. Terpugov // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics – 2014 – № 5(3), P. 374-377.

Прочие публикации по материалам диссертации.

1) Валеев, А.И. Особенности генерации второй гармоники в церийсодержащих свинцово-фосфатных стеклах / А.И. Валеев, Н.Д. Кундикова, Д.Г. Пихуля, К.О. Щавелев, О.С. Щавелев // Труды третьей международной конференции молодых ученых и специалистов „Оптика-2003“, Санкт-Петербург, 20–23 октября 2003, С. 88–89.

2) Пихуля, Д.Г. Оценка электропроводности стекол, пригодных для фотоиндуцированной генерации второй гармоники / Д.Г. Пихуля // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам „Ломоносов-2005“, 13–17 апреля 2005, Москва, сборник трудов, С. 157.

4) Валеев, А.И. Термостабильность фотоиндуцированной квадратичной нелинейности в свинцово-фосфатных стеклах / А.И. Валеев, Н.Д. Кундикова, Д.Г. Пихуля, К.О. Щавелев, О.С. Щавелев // Известия Челябинского научного центра. – 2007. – № 3. – С. 15–19.

5) Пихуля, Д.Г. Зонные структуры трехмерных фотонных кристаллов, получаемых методом интерференционной литографии / Д.Г. Пихуля, Ю.В. Микляев // Труды четвертой международной конференции молодых ученых и специалистов „Оптика-2005“, 17–21 октября 2005, Санкт-Петербург, С. 239–240.

6) Микляев, Ю.В. Расчет схемы отображения дифракционной решетки для синтеза фотонных кристаллов / Ю.В. Микляев, Н.Д. Кундикова, Д.Г. Пихуля // Труды международной научной конференции „Параллельные вычислительные технологии“, 29 января – 2 февраля 2007, Челябинск, т. 2, С. 262.

7) Пихуля, Д.Г. Оптимизация структуры фотонных кристаллов с помощью генетического алгоритма / Д.Г. Пихуля, Ю.В. Микляев // Труды пятой международной конференции молодых ученых и специалистов „Оптика-2007“. – 2007. – 16–20 октября 2007, Санкт-Петербург. С. 412–413.

8) Кундикова, Н.Д. Оптимизация структуры трехмерных фотонных кристаллов, получаемых интерференционной литографией при трехкратном экспонировании / Н. Д. Кундикова, Ю. В. Микляев, Д. Г. Пихуля // Труды шестой международной конференции „Фундаментальные проблемы оптики-2010“. – 2010. – 18–22 октября 2010, Санкт-Петербург.

9) Герасимов, А.М. Генерация второй гармоники в одномерном фотонном кристалле, изготовленного из изотропного материала / А. М. Герасимов, Н. Д. Кундикова, Ю. В. Микляев, Д. Г. Пихуля, М. В. Терпугов // Сборник трудов VIII международной конференции аспирантов и молодых ученых „Оптика-2013“. –2013. – Санкт-Петербург. С. 143–146.

Пихуля Денис Григорьевич

**ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ
ИЗ ИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА
ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ**

Специальность 01.04.07 – "Физика конденсированного состояния"

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Издательство Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 00.00.2015. Формат 60 × 84 1/16. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 0,70. Уч.-изд.л. 0,78. Тираж 100 экз. Заказ 000/000.

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ:
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.