На правах рукописи

## Свяховский Сергей Евгеньевич

# Динамическая дифракция фемтосекундных лазерных импульсов в одномерных фотонных кристаллах

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук Работа выполнена на кафедре квантовой электроники физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова"

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент Мурзина Татьяна Владимировна

Официальные оппоненты: Горелик Владимир Семенович,

доктор физико-математических наук, профессор Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук, заведующий лабораторией.

#### Мерзликин Александр Михайлович,

кандидат физико-математических наук Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук (ИТПЭ РАН), ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Защита состоится 22 мая 2014 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 при Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, дом 1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться Отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ апреля 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 501.001.31, к.ф.-м.н.

Коновко Андрей Андреевич

## Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена исследованию распространения лазерных импульсов фемтосекундной длительности в фотонных кристаллах в условиях Брэгговской динамической дифракции в геометрии Лауэ. Основные результаты работы опубликованы в статьях [1-3] и сборниках трудов [4-13].

Актуальность проведенных в работе исследований во многом обусловлена растущим интересом к оптике фотонных кристаллов (ФК) - структур с периодической пространственной модуляцией показателя преломления с периодом порядка длины волны видимого света. Фотонные кристаллы являются объектом интенсивных исследований на протяжении более двух десятилетий. Так например, благодаря наличию фотонной запрещенной зоны, т.е. диапазона частот, в котором невозможно распространение света внутри кристалла, поэтому возможна реализация различных интересных эффектов: изменение плотности оптических мод [14], усиление линейных и нелинейных оптических эффектов, таких как генерация второй и третьей оптической гармоники, эффект Фарадея [15], рамановское рассеяние [16]. Рассмотрение периодической структуры фотонного кристалла ведётся в терминах физики твёрдого тела: для периодической структуры используется теорема Блоха и вводятся энергетические зоны. Альтернативным подходом к описанию оптических эффектов в фотонных кристаллах является теория динамической дифракции [17], хорошо разработанная для дифракции рентгеновского излучения на кристаллических телах.

В рамках динамической теории дифракции в фотонных кристаллах были обнаружены эффекты, ранее наблюдавшиеся в рентгеновской оптике: эффект Боррманна [18] и маятниковый эффект [19].

Особый интерес представляет оптика сверхбыстрых процессов, динамика распространения фемтоскеундных импульсов и возможность управления ими. В рамках теории динамической дифракции был теоретически предсказан эффект временного деления коротких лазерных импульсов в фотонном кристалле в геометрии Лауэ [20]. Эффект состоит в разделении проходящего сквозь фотонный кристалл импульса излучения на два последовательных. Представляет интерес управление длительностью фемтосекундных импульсов: в геометрии Лауэ возможно наблюдение компрессии лазерного импульса при его распространении в фотонном кристалле [21]. В рамках эффекта временного деления для каждого из разделённых импульсов возможно наблюдение селективной компрессии и самофокусировки [22] в случае, когда исходный импульс имеет квадратичную модуляцию фазы во временной или пространственной области, соответственно. Экспериментальное обнаружение и исследование данных эффектов является актуальным, поскольку позволит пролить свет как на фундаментальные проблемы фемтосекундной оптики фотонных кристаллов, так и поможет добиться прогресса в области прикладных задач по управлению сверхкороткими лазерными импульсами.

**Цель работы** состояла в исследовании оптических эффектов, возникающих при динамической дифракции фемтосекундных лазерных импульсов в одномерных фотонных кристаллах на основе пористого оксида кремния (пористого кварца) в геометрии Лауэ.

Обоснованность и достоверность полученных в работе результатов подтверждается, прежде всего, соответствием экспериментально полученных результатов и их теоретического описания. Экспериментальные результаты согласуются с результатами численного моделирования путём прямого решения уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области. Все используемые в экспериментах измерительные приборы были протестированы и откалиброваны, их инструментальная погрешность определялась независимо в ходе тестовых экспериментов с заведомо предсказуемыми результатами. Эксперименты выполнялись многократно с повторяемыми результатами. Результаты опубликованы в рецензируемых журналах, обсуждены на международных конференциях, семинарах.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- 1. Экспериментально обнаружен эффект дифракционноиндуцированного временного деления лазерных импульсов в одномерных фотонных кристаллах, ранее предсказанный аналитически.
- Обнаружена поляризационная зависимость эффекта временного деления лазерных импульсов при динамической дифракции света в одномерных фотонных кристаллах.
- 3. Впервые исследована селективная компрессия боррманновского и антиборрманновского импульсов при реализации эффекта временного деления в условиях динамической дифракции фемтосекундных лазерных импульсов с квадратичной модуляцией фазы в одномерных фотонных кристаллах.
- 4. Впервые изготовлены одномерные фотонные кристаллы из пористого кремния и пористого кварца, сохраняющие периодичность на протяжении тысяч слоёв.

**Практическая значимость** полученных результатов состоит в развитии экспериментальных подходов по расширению возможностей по управлению лазерными импульсами при помощи устройств на основе фотонных кристаллов. Важным результатом является усовершенствование метода изготовления фотонных кристаллов на основе пористого кремния и пористого кварца, состоящих из большого числа периодов, что перспективно для создания на их основе устройств фотоники.

#### Защищаемые положения:

- 1. Метод изготовления одномерных фотонных кристаллов на основе пористого кремния и пористого кварца позволяет изготавливать образцы, структура которых насчитывает до 5000 слоев с контрастом показателя преломления между соседними слоями более 0.4 (для пористого кремния) и более 0.2 (для пористого кварца).
- В фотонных кристаллах при динамической брэгговской дифракции в геометрии Лауэ возможно наблюдение эффекта дифракционноиндуцированного временного деления фемтосекундных лазерных импульсов.
- 3. В одномерных фотонных кристаллах на основе окисленного пористого кремния поляризационная зависимость эффекта временного деления импульсов при динамической дифракции в геометрии Лауэ существенно зависит от поляризации исходного импульса и обусловлена влиянием двух факторов: решёточной анизотропии фотонного кристалла и материальной анизотропии пористого кварца.
- 4. При распространении в фотонном кристалле частотномодулированных фемтосекундных импульсов оптического излучения в геометрии Лауэ проявляется эффект селективного сжатия импульсов, сформировашихся в результате эффекта дифракционноиндуцированного временного деления импульсов.

**Личный вклад автора.** Все полученные в работе результаты являются оригинальными и получены лично автором. Вклад автора заключался в проведении всех представленных в оригинальной части работы экспериментальных исследований и численного моделирования, создании всех описанных экспериментальных установок и написании программного кода для численного моделирования.

**Публикации.** Основные результаты, полученные в данной работе, опубликованы в трёх статьях, список которых приведён в конце автореферата.

Апробация работы. Результаты работы представлены на 27 докладах на всероссийских и международных конференциях, наиболее значимые из которых: SPIE Optics+Photonics 2010 (Сан Диего, США), Frontiers in Optics 2011 (Сан Хосе, США), Laser Optics 2012 (Санкт-Петербург, Россия), 50 Years of Nonlinear Optics (2012 г., Барселона, Испания), Frontiers in Optics 2012 (Рочестер, США), ICONO LAT 2013 (Москва, Россия), Frontiers in Optics 2013 (Орландо, США). Список основных опубликованных тезисов докладов приведён в конце автореферата.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитированной литературы. Работа состоит из 137 страниц и содержит 79 иллюстраций, 2 таблицы и 134 библиографических ссылки.

## Содержание работы

**Введение.** Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи исследования, приводятся положения, выносимые на защиту, отмечается научная новизна и практическая значимость работы, приводятся сведения о публикациях результатов работы, апробации и структуре диссертации.

**Глава 1** "Электромагнитные волны в периодических средах: теоретические и экспериментальные исследования (обзор литературы)".

В главе рассмотрены основные работы в области волновой оптики периодических сред. Сопоставлены результаты, полученные в начале-середине XX века в рентгеновской оптике с новыми результатами исследований оптики фотонных кристаллов. Рассказано об основных методах расчета оптических характеристик периодических сред, включая аналитические и численные методы. Приведен обзор теоретических и экспериментальных результатов исследований в области динамической дифракции в периодических структурах.

Динамическая дифракция электромагнитных волн в периодических структурах известна более 100 лет и впервые наблюдалась в рентгеновском диапазоне [23]. За прошедшее время теория дифракции рентгеновских лучей в кристаллах существенно расширилась [17]. При описании рентгеновской дифракции можно использовать два подхода: кинематическую и динамическую теории [24]. Кинематическая теория дифракции рассматривает рассеяние излучения на каждом элементе объёма, при этом учитывается взаимодействие атомов только с первичной волной, взаимодействие с волнами, рассеянными другими атомами, игнорируются [25]. Динамическая теория рассматривает все взаимодействия волн во всём объёме кристалла. Принято различать два геометрических случая динамической брэгговской дифракции излучения в кристаллическом теле: отражение (геометрия Брэгга) и прохождение (геометрия Лауэ) [24, 25] (рис. 1).



Рис. 1: Геометрия Брэгга (а) и геометрия Лауэ (б) при динамической дифракции электромагнитных волн в периодических средах.



Рис. 2: Схема дифракционного деления падающего на ФК лазерного импульса. T и R- прошедшая и дифрагированная пара импульсов.

Динамическая дифракция света в фотонных кристаллах наблюдалась ранее в искусственных опалах [26]. В оптическом диапазоне обнаружены эффект Боррманна и маятниковый эффект, описываемые теорией динамической дифракции и наблюдаемые ранее в рентгеновском диапазоне. Теоретическое рассмотрение дифракции световых пучков и коротких импульсов в фотонном кристалле в схеме Лауэ было проведено в [27]. Вычисления показывают, что после выходной грани фотонного кристалла будут наблюдаться 4 импульса света (рис. 2). Это вызвано двумя последовательными делениями импульсов: временным делением, происходящим в объёме фотонного кристалла вследствие различия эффективной групповой скорости волн, и пространственным делением, имеющим место на выходной грани кристалла. Разница в групповых скоростях двух волн происходит вследствие перераспределения поля исходного импульса: поле каждой волны локализовано преимущественно в слоях фотонного кристалла своего типа. Согласно устоявшейся в литературе терминологии импульс, идущий первым в паре разделённых, именуется *боррманновским*, второй - *антиборрманновским*)

Большинство современных способов изготовления фотонных кристаллов плохо подходят для наблюдения временного деления: требуется одновременно и высокий контраст показателей преломления соседних слоёв, и большая длина образца, но, как правило, технологически достижимо лишь одно из двух этих свойств. В данной работе для наблюдения временного деления были выбраны фотонные кристаллы на основе пористого кремния.

**Глава 2** "Изготовление и характеризация фотонных кристаллов на основе пористых кремния и оксида кремния"

Глава посвящена развитию метода изготовления фотонных кристаллов на основе пористого кремния и пористого плавленого кварца методами электрохимии. Рассматриваются основные свойства процесса электрохимического травления кристаллического кремния в растворе фтороводородной (плавиковой) кислоты HF. Методами оптической спектроскопии и электронной микроскопии изучена зависимость процесса электрохимического травления от продолжительности травления, плотности тока через электрохимическую ячейку, концентрации плавиковой кислоты. Исследуются причины ухудшения травления с увеличением глубины пор в структуре, предлагается схема выравнивания плавиковой кислоты в объёме раствора. Рассказывается о термическом окислении пористого кремния для получения пористого плавленого кварца.

В качестве исходного материала использовались пластины кристаллического Si (001) *р*-типа, легированного бором. Удельное сопротивление пластин составляло 0.002 ÷ 0.005 Ом·см. Образец имеет период 800 нм.



Рис. 3: Снимок бокового скола образца фотонного кристалла из пористого кремния, выполненный при помощи сканирующего электронного микроскопа.

Объёмная структура ФК была исследована при помощи сканирующей электронной микроскопии (рис. 3). На снимке видно, что образец состоит из двух типов слоёв, имеющих чётко выраженные границы. Периодичность сохраняется на протяжении всей структуры. Границы слоёв остаются ровными.



Рис. 4: Изготовленная по технологии электрохимического травления кремния серия фотонных кристаллов, фотонные запрещенные зоны которых расположены в видимом диапазоне спектра.

В работе продемонстрировано, что с помощью подбора параметров электрохимического травления возможно изготовить структуры на основе пористого кремния физической толщиной до 400 мкм без ухудшения характеристик структуры с увеличением глубины пор с положением фотонной запрещённой зоны в любой желаемой области спектра. В качестве иллюстрации данной возможности на рис. 4 представлена фотография серии изготовленных по используемой технологии фотонных кристаллов.

В работе исследованы особенности термического окисления пористого кремния в воздушной атмосфере при температурах 600-900°С. Показано, что получаемые в ходе этого процесса структуры из пористого оксида кремния сохраняют свою фотоннокристаллическую структуру.

По итогам данной главы можно выделить следующие выводы:

- Усовершенствован способ изготовления одномерных фотонных кристаллов на основе пористого кремния и пористого кварца для большого числа (до 5000) слоёв.
- Методами структурного анализа и оптической спектроскопии показано, что изготовленная структура сохраняет пространственную периодичность и неизменность свойств каждого из двух типов чередующихся слоев на всей глубине структуры (вплоть до 400 мкм).
- На основе данных материалов возможно изготовление однородной пористой структуры с порами, ориентированными нормально к поверхности. Соотношение высоты и ширины единичной поры составляет 10<sup>4</sup> : 1.

Глава 3 "Временное деление лазерных импульсов в одномерных фотонных кристаллах, вызванное брэгговской динамической дифракцией в геометрии Лауэ" В данной главе представлены результаты экспериментального обнаружения эффекта дифракционного деления фемтосекундных световых импульсов в фотонных кристаллах. Для наблюдения временного деления импульсов был использован метод, основанный на измерении автокорреляционной функции. Метод отличается хорошим временным разрешением (порядка длительности импульса лазера), а также относительной простотой.

Для наблюдения эффекта временного деления фемтосекундных импульсов был изготовлен образец фотонного кристалла на основе пористого кремния, содержащий 375 периодов (750 слоёв) по методу электрохимического травления кремния с последующим температурным отжигом. Пространственный период образца составлял d = 775 нм, показатели преломления слоёв  $n_1 = 1.48$ ,  $n_2 = 1.32$ . Размеры образца (рис. 5 а) составляли a = 0.3 мм, b = 2.0 мм,c = 5.0 мм.

Схема эксперимента по наблюдению эффекта дифракционного деления импульсов в фотонных кристаллах приведена на рис. 5 (а). В качестве источника световых импульсов использовался фемтосекундный титансапфировый лазер (длина волны 800 нм, длительность импульса 100 фс, средняя мощность 100 мВт, частота повторения импульсов 80 МГц).

Наблюдаемое в эксперименте распространение входящего импульса света при соблюдении точного условия Брэгта  $\theta = \theta_B = 30^\circ$  продемонстрировано на рис. 5 (б). Из приведённой фотографии видно, что излучение распространяется в пределах выраженного канала, направленного по нормали к входной грани ФК. При отклонении угла падения от условия Брэгга ( $\theta = 34^\circ$ ) наблюдается разделение канала на два, расходящихся под разными углами. При достижении боковых граней каналы переотражаются от них (рис. 5 в).



Рис. 5: (a) - схема эксперимента по наблюдению деления фемтосекундных импульсов, (б),(в) - фотоснимки распространения луча внутри фотонного кристалла при углах падения 30 и 34 градуса.

Измеренные автокорреляционные функции в прошедшем и дифрагировавшем лучах приведены на рис. 6 (а, б), сплошная линия. Наличие

трёх максимумов автокорреляционной функции соответствует двум последовательным импульсам сигнала, пришедшего на вход в автокоррелометр. Экспериментально измеренное время деления импульсов  $t_{12}$  составило  $0.57 \pm 0.01$  пикосекунд.

Аналитический расчет временной зависимости интенсивности излучения на выходе из кристалла для данного эффекта и для использовавшихся в эксперименте параметров даёт величину времени деления  $t_{12} = 0.58$  пс.



Рис. 6: Автокорреляционные функции излучения, дифрагировавшего на фотонном кристалле: прошедший (а) и дифрагировавший (б) лучи в сравнении с результатом теоретического расчёта.

Было проведено численное моделирование эффекта временного деления по алгоритму FDTD [28] - непосредственное численное решение уравнений Максвелла. Алгоритм FDTD в рамках данной работы был реализован в собственном программном коде на языке C++. Результаты численного моделирования соответствуют результатам эксперимента и аналитического расчёта. По материалам данной главы были сделаны следующие выводы:

- 1. Впервые экспериментально обнаружен эффект дифракционноиндуцированного временного деления импульсов света в фотонных кристаллах. Для кристалла из пористого кварца показателями преломления  $n_1 = 1.48$ ,  $n_2 = 1.32$ , длиной z = 2 мм, периодом d = 0.8мкм время деления составило  $0.57 \pm 0.01$  пс, что совпадает с аналитически вычисленным значением.
- 2. Время деления импульсов линейно зависит от длины фотонного кристалла, что подтверждает объёмный характер данного эффекта.

 Эффект временного деления импульсов оптически линеен: параметры эффекта не зависят от мощности падающего на кристалл излучения.

**Глава 4** "Управление фемтосекундными импульсами при помощи эффекта временного деления в фотонных кристаллах"

В данной главе представлены результаты исследования особенностей эффекта временного деления фемтосекундных лазерных импульсов в фотонных кристаллах, индуцированного брэгговской дифракцией в геометрии Лауэ. Экспериментально и при помощи численного моделирования исследована поляризационная зависимость данного эффекта. Представлены экспериментальные результаты по наблюдению эффекта селективной временной компрессии импульсов при дифракционно-индуцированном временном делении фемтосекундных импульсов. Экспериментальные результаты сопоставлены с результатами аналитического расчёта и численного моделирования по методу FDTD.



Рис. 7: Экспериментальная установка, предназначенная для измерения кросскорреляционной функции излучения, прошедшего сквозь фотонный кристалл.

Эксперименты проводились с использованием метода кросскорреляционной функции. Экспериментальная установка представлена на рис. 7. В качестве источника излучения использовался лазер на основе титаната сапфира (средняя мощность 400 мВт, *p*-поляризация, длительность импульса 40 фс). Излучение лазера делилось в соотношении 80:20 на два плеча, в каждом плече был собран четырёхпризменный компрессор, сжимающий фемтосекундные импульсы света во времени, что необходимо для компенсации дисперсии оптических элементов, а также частотной модуляции импульса, падающего на ФК. Погрешность измерения времени для данной установки составила 2 фс.

Излучение фокусировалось на образец (пористый кварц, длина 2.4 мм) стеклянной линзой в перетяжку порядка 20 мкм. Поляризация падающего на образец излучения регулировалась при помощи пластинок  $\lambda/2$ , помещённых до и после образца. Излучение, вышедшее из образца, при помощи зеркального параболического отражателя преобразовывалось в параллельный пучок и складывалось с излучением другого плеча в фокусе сферического зеркала на кристалле бета-бората бария (BBO). Интенсивность неколлинеарной второй гармоники, генерируемой при смешении излучений различных плеч, пропорциональна кросс-корреляционной функции излучения, прошедшего через образец. Установка предоставлена Институтом Спектроскопии РАН г. Троицк.

Поляризационная зависимость эффекта временного деления импульсов.

При исследовании зависимостей эффекта была обнаружена существенная зависимость эффекта от поляризации излучения.



Рис. 8: Экспериментально измеренные кросс-корреляционные функции излучения, дифрагировавшего на фотонном кристалле для случая p- и s-поляризации излучения накачки.

На рис. 8 представлены измеренные кросс-корреляционные функции излучения для p- и s-поляризации падающего излучения. Видно, что деление импульсов в случае p-поляризации имеет большую величину. Время деления для экспериментального образца составляет  $746 \pm 2$  фс для p-поляризации и  $518 \pm 2$  фс для s-поляризации.

Экспериментальные результаты соответствуют предсказаниям динамической теории дифракции света в фотонных кристаллах. При этом поляризационная зависимость эффекта возникает при учёте в волновом уравнении пространственной дисперсии в виде градиента диэлектрической проницаемости. В одномерных фотонных кристаллах она возникает благодаря наличию выделенного направления градиента диэлектрической проницаемости - по нормали к слоям ФК. Следовательно, в одномерном фотонном кристалле будет наблюдаться поляризационная зависимость решёточной дисперсии - так называемая *решёточная анизотропия*.

Дополнительный вклад в поляризационную зависимость вносит оптическая материальная анизотропия пористого оксида кремния. Пористая структура образца обуславливает наличие оптической оси, направленной вдоль пор в направлении нормали к слоям. Существование этого вида анизотропии подтверждается экспериментально: измеренные значения показателей преломления слоёв фотонного кристалла для обыкновенной и необыкновенной волн составляют  $n_{1,o} = 1.46$ ,  $n_{1,e} = 1.45$ ,  $n_{2,o} = 1.35$ ,  $n_{2,e} = 1.32$ . Из этих значений следует, что материальная анизотропия (контраст между показателями преломления обыкновенной и необыкновенной волн) имеет различную величину для различных слоёв слоёв.

Вклад этой анизотропии в поляризационную зависимость имеет тот же знак, что и вклад решёточной анизотропии, но имеет меньшую величину.

Аналитический расчёт распределения поля импульса на выходе из фотонного кристалла для различных поляризаций представлен на рис. 9. В расчёте были учтены как решёточная анизотропия, так и материальная.



Рис. 9: Аналитически вычисленное распределение комплексной амплитуды поля импульса на выходе из фотонного кристалла для различных поляризаций накачки (a) p, (б) s; (в) - сечение распределения при x = 0. Цветовая шкала для комплексных чисел приведена на вставке.

#### Динамическая дифракция частотно-модулированного импульса.

Благодаря различной решёточной дисперсии фотонного кристалла для боррманновского и антиборрманновского импульсов имеет место следующий эффект: при распространении импульса с квадратичной модуляцией фазы происходит селективная компрессия (декомпрессия) разделенных импульсов, что было теоретически предсказано в [22].

Эксперимент проводился на установке, схема которой приведена на рис. 7. При этом частотная модуляция (чирп) импульса, падающего на образец, вводилась при помощи компрессора сигнального канала.

Величина чирпа определяется как характеристика уширения импульса до ширины  $\tau$  после компрессора относительно ширины исходного  $\tau_0$ 

согласно формуле  $\beta = \pm \sqrt{\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)} - 1$  где знак "+"соответствует положительному чирпу, знак "-"соответствует отрицательному чирпу.

При изменении чирпа исходного импульса в диапазоне (-4...+4) были измерены ширины боррманновского и антиборрманновского импульсов. Результат измерения приведён на рис. 10.



Рис. 10: Зависимость ширин боррманновского и антиборрманновского импульсов от чирпа в сравнении с шириной исходного импульса. (а) - экспериментально измеренные значения, (б) - результаты численного моделирования по методу FDTD.

Видно, что при отрицательном чирпе ширина боррманновского импульса меньше ширины исходного, а ширина антиборрманновского больше. При уменьшении модуля чирпа длительность сжатого импульса приближается к длительности исходного и при чирпе  $\beta \sim -1.5$  их длительности сравниваются. При этом величина компрессии импульса соответствует расплыванию, обусловленному дисперсией образца. Импульс распространяется внутри образца без изменений. Парный к нему антиборрманновский импульс расплывается. При нулевом чирпе структурная дисперсия не влияет на расплывание импульсов и длительность боррманновского и антиборрманновского импульсов почти одинакова.

По данной главе сделаны следующие выводы:

- 1. Обнаружена поляризационная зависимость эффекта дифракционного деления лазерных импульсов в фотонных кристаллах. Время деления в случае *p*-поляризации превосходит в 1.6 раза время деления для *s*-поляризации.
- Исследован эффект дифракционного деления импульсов в фотонном кристалле, материалы слоёв которого представляют собой анизотропную одноосную среду. Вклад в различие времен деления *p*-и *s*-поляризаций совпадает по знаку, но вклад решёточной анизотропии превосходит вклад материальной.
- 3. Исследовано распространение импульсов с квадратичной модуляцией фазы в фотонном кристалле в геометрии Лауэ. Экспериментально обнаружено селективное сжатие импульсов: при положительном чирпе боррмановский импульс уширяется, а антиборрманновский сжимается, при отрицательном чирпе наблюдается обратная зависимость.
- Показано, что для достаточно малой длительности импульсов (35 фс) рассмотрение динамической дифракции неудовлетворительно описывается в рамках существующей аналитической теории, поскольку нарушается применимость двухволнового приближения.
- 5. Результаты численного расчета по методу FDTD находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

В Заключении подведены итоги диссертационной работы и сформулированы основные результаты работы. Основные результаты, полученные в работе, состоят в следующем:

- Усовершенствован метод изготовления одномерных фотонных кристаллов на основе пористого кремния и пористого кварца, структура которых насчитывает до 5000 слоев, с контрастом показателя преломления соседних слоёв более 0.4 (для пористого кремния) и более 0.2 (для пористого кварца). Методами структурного анализа и оптической спектроскопии показано, что изготовленная структура сохраняет пространственную периодичность и неизменность свойств каждого из двух типов чередующихся слоев на всей глубине структуры (около 400 мкм).
- Экспериментально обнаружен эффект дифракционноиндуцированного временного деления фемтосекундных лазерных импульсов в многослойных фотонных кристаллах при динамической

брэгговской дифракции в геометрии Лауэ. Показано, что для фотонных кристаллов из пористого кварца эффект дифракционного деления импульсов оптически линеен, время деления импульсов пропорционально длине оптического пути в структуре. Интервал между импульсами на выходе из фотонного кристалла толщиной два миллиметра достигает 0.6 пс, что соответствует результатам аналитических расчетов и численного моделирования.

- 3. Обнаружена зависимость эффекта временного деления лазерных импульсов в фотонных кристаллах от поляризации исходного импульса. Показано, что для фотонных кристаллов на основе пористого кварца время деления в случае р-поляризации превосходит в 1.6 раза время деления для s-поляризации.
- 4. Эффект временного деления лазерных импульсов при динамической дифракции в геометрии Лауэ исследован в одномерных фотонных кристаллах с двулучепреломлением материала слоёв (пористого кварца). Показано, что в случае анизотропного одноосного материала слоёв различие времен деления импульсов для р- и sполяризаций определяется как двулучепреломлением материала слоёв, так и структурной анизотропией фотонного кристалла. Выделены вклады каждого из перечисленных эффектов.
- 5. Исследовано распространение фемтосекундных импульсов с квадратичной модуляцией фазы в одномерном фотонном кристалле в геометрии Лауэ. Экспериментально обнаружено селективное сжатие импульсов при эффекте временного деления: при положительном чирпе первый импульс в паре разделившихся уширяется во времени, второй импульс сжимается, при отрицательном чирпе наблюдается обратная зависимость. Измерена зависимость ширины разделившихся импульсов от величины чирпа исходного импульса.
- 6. Методом конечных разностей во временной области проведено численное моделирование эффектов распространения лазерного излучения при брэгговской дифракции в геометрии Лауэ в фотонных кристаллах с параметрами, соответствующими экспериментально исследованным образцам. Получено хорошее согласие результатов расчетов с экспериментальными данными. Показано, что существующая на данный момент теория динамической дифракции импульсов в фотонных кристаллах выходит за границы своей применимости при рассмотрении достижимых в эксперименте достаточно коротких импульсов.

## Публикации по теме диссертации в журналах

- Svyakhovskiy S. E., Kompanets V. O., Maydykovskiy A. I., Murzina T. V., Chekalin S. V., Skorynin A. A., Bushuev V. A., Mantsyzov B. I. Observation of the temporal bragg-diffraction-induced laser-pulse splitting in a linear photonic crystal // Physical Review A. - 2012. - Vol. 86. - P. 013843.
- [2] Svyakhovskiy S. E., Maydykovsky A. I., Murzina T. V. Mesoporous silicon photonic structures with thousands of periods // Journal of Applied Physics. - 2012. - Vol. 112, no. 1. - P. 013106.
- [3] Svyakhovskiy S.E., Skorynin A.A., Bushuev V.A., Chekalin S.V., Kompanets V.O., Maydykovskiy A.I., Murzina T.V., Novikov V.B., Mantsyzov B.I. Polarization effects in diffraction-induced pulse splitting in onedimensional photonic crystals // Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics. - 2013. - Vol. 30, no. 5. - Pp. 1261-1269.

# Основные публикации по теме диссертации в сборниках и трудах конференций

- [4] Svyakhovskiy S. E., Maydykovskiy A. I, Novikov V. B., Kompanets V. O., Chekalin S. V., Skorynin A. A., Bushuev V. A., Mantsyzov B. I., Murzina T. V. Selective compression of femtosecond laser pulses in a linear photonic crystal // Frontiers in Optics (FiO)/Laser Science (LS). – Washington, DC: Optical Society of America, 2013. – P. FTu3A.21.
- [5] Svyakhovskiy S. E., Skorynin A. A., Bushuev V. A., Maydykovskiy A. I., Murzina T. V., Novikov V. B., Mantsyzov B. I. Polarization and nonlinear effects in diffraction-induced laser pulse splitting in photonic crystals // ICONO/LAT 2013. — Moscow: 2013. — P. IThH2.
- [6] Svyakhovskiy S. E., Skorynin A. A., Bushuev V. A., Chekalin S. V., Kompanets V. O., Maydykovskiy A. I., Murzina T. V., Novikov V. B., Mantsyzov B. I. Polarization and nonlinear effects in diffraction-induced laser pulse splitting in one-dimensional photonic crystals // CLEO Europe. — Munich: 2013. — Pp. CK–P.21 MON.
- [7] Svyakhovskiy S. E., Maydykovskiy A. I, Novikov V. B., Kompanets V. O., Chekalin S. V., Skorynin A. A., Bushuev V. A., Mantsyzov B. I., Murzina T. V. Experimental studies of laue diffraction in photonic crystals // Lomonosovskie Chteniya 2013. — Moscow: 2013.
- [8] Svyakhovskiy S. E., Maydykovskiy A. I, Novikov V. B., Kompanets V. O., Chekalin S. V., Skorynin A. A., Bushuev V. A., Mantsyzov B. I., Murzina T. V. Bragg diffraction-induced splitting of femtosecond laser pulses

in a photonic crystal // Frontiers in Optics (FiO)/Laser Science (LS). — Washington, DC: Optical Society of America, 2012. — P. FTh1A.5.

- [9] Svyakhovskiy S. E., Maydykovskiy A. I, Novikov V. B., Kompanets V. O., Chekalin S. V., Skorynin A. A., Bushuev V. A., Mantsyzov B. I., Murzina T. V. Diffraction-induced laser pulse splitting in photonic crystals: polarization properties, selective compression and self-focusing // 50 years of Nonlinear Optics Symposium. — Barcelona: 2012. — P. TP.SE.
- [10] Svyakhovskiy S. E., Maydykovskiy A. I, Novikov V. B., Kompanets V. O., Chekalin S. V., Skorynin A. A., Bushuev V. A., Mantsyzov B. I., Murzina T. V. Temporal bragg diffraction-induced laser pulse splitting in a linear photonic crystal // 15th international conference "Laser optics 2012". — Saint-Petersburg: 2012.
- [11] Свяховский С. Е., Майдыковский А. И., Новиков В. Б., Скорынин А. А., Бушуев В. А., Мурзина Т. В., Манцызов Б. И. Экспериментальное обнаружение дифракционно-индуцированного фемтосекундных лазерных временного деления импульсов одномерном фотонном кристалле // Семинар «Волновые явления в неоднородных средах – Волны 2012». — физический факультет МГУ, 2012.
- [12] Svyakhovskiy S. E., Maydykovskiy A. I., Aktsipetrov O. A. Pendellösung effect in one-dimensional porous silicon photonic crystals // Frontiers in Optics (FiO)/Laser Science (LS). — Washington, DC: Optical Society of America, 2011.
- [13] Svyakhovskiy S. E., Maydykovskiy A. I., Aktsipetrov O. A. Experimental observation and numerical simulation of the laue diffraction in one-dimensional photonic crystals. // Nanophotonic Materials VII. – Vol. 7755. – SPIE, 2010.

### Список цитированной литературы

- [14] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // Phys. Rev. Lett. - 1987. - Vol. 58. - Pp. 2059-2062.
- [15] Merzlikin A. M., Vinogradov A. P., Inoue M., Khanikaev A. B., Granovsky A. B. The faraday effect in two-dimensional magneto-photonic crystals // Journal of magnetism and magnetic materials. - 2006. - Vol. 300, no. 1. - Pp. 108-111.
- [16] Gorelik V. S., Zlobina L. I., Fadyushin A. B., Chervyakov A. V. et al. Raman scattering in three-dimensional photonic crystals // Journal of Russian Laser Research. – 2005. – Vol. 26, no. 3. – Pp. 211–227.

- [17] Пинскер З. Г. Рентгеновская кристаллооптика. М.: Наука, 1982.
- [18] Vinogradov A. P., Lozovik Yu. E., Merzlikin A. M., Dorofeenko A. V., Vitebskiy I., Figotin A., Granovsky A. B., Lisyansky A. A. Inverse borrmann effect in photonic crystals // Phys. Rev. B. - 2009. - Dec. --Vol. 80. - P. 235106.
- [19] Mocella V. Negative refraction in photonic crystals: thickness dependence and pendellösung phenomenon. // Opt. Express. - 2005. - Mar. - Vol. 13, no. 5. - Pp. 1361-1367.
- [20] Bushuev V. A., Mantsyzov B. I., Skorynin A. A. Diffraction-induced laser pulse splitting in a linear photonic crystal // Phys. Rev. A. - 2009. – May. – Vol. 79, no. 5. – P. 053811.
- [21] Аракелян, С. М. and Геворкян, Л. П. and Макаров, В. А. Компрессия частотно-модулированных импульсов при динамическом рассеянии в геометрии Лауэ // Квант. электрон. 1989. Арг. Т. 16, № 2. С. 1846–1849.
- [22] Скорынин А. А., Бушуев В. А., Манцызов Б. И. Динамическая брэгговская дифракция оптических импульсов в фотонных кристаллах в геометрии лауэ: Дифракционное деление, селективное сжатие и фокусировка импульсов // ЖЭТФ. — 2012. — Т. 142, № 1. — С. 64.
- [23] Friedrich W., Knipping P., Laue M. Interferenzerscheinungen bei rontgenstrahlen // Annalen der Physik. – 1913. – Vol. 346, no. 10. – Pp. 971–988.
- [24] Batterman B. W., Cole H. Dynamical diffraction of x rays by perfect crystals // Rev. Mod. Phys. - 1964. - Jul. - Vol. 36. - Pp. 681-717.
- [25] *Пинскер З. Г.* Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в идеальных кристаллах. — М.: Наука, 1974.
- [26] Gorelik V. S. Optics of globular photonic crystals // Quantum Electronics. - 2007. - Vol. 37, no. 5. - Pp. 409-432.
- [27] Бушуев В.А., Манцызов Б.И. Линейный эффект удвоения частоты следования лазерных импульсов при лауэ-геометрии брэгговской дифракции в фотонном кристалле // Изв. РАН. серия физическая. — 2008. — Vol. 72, по. 1. — Pp. 36–40.
- [28] Taflove A., Hagness S. C. Computational electrodynamics. 1995.