

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

НОВИКОВ ВЛАДИМИР БОРИСОВИЧ

**ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ
ЭФФЕКТЫ В ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ ПРИ
БРЭГГОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ В ГЕОМЕТРИИ
ЛАУЭ**

Специальность
01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

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

Официальные оппоненты: **Головань Леонид Анатольевич**,
доктор физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», физический факультет, кафедра общей физики и молекулярной электроники, профессор.

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

Чернега Николай Владимирович,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Отделение оптики, ведущий научный сотрудник.

Защита состоится «_____» _____ 2018 г. в _____ на заседании диссертационного совета МГУ.01.13 Московского государственного университета 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.

E-mail: diss.sov.31@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: https://istina.msu.ru/dissertation_councils/councils/33919655/.

Автореферат разослан «_____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МГУ.01.13, к.ф.-м.н.

Коновко Андрей Андреевич

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена исследованию оптических эффектов, возникающих при распространении света в дифракционно-толстых фотонных кристаллах при брэгговской дифракции в геометрии Лауэ. В работе экспериментально обнаружены и изучены линейные оптические явления: маятниковый эффект и эффект Бормана, а также нелинейный эффект генерации второй оптической гармоники.

Актуальность темы диссертации

В области науки и техники актуальны задачи разработки новых устройств управления основными параметрами оптического излучения. Высокий интерес к фотонным кристаллам (ФК) вызван перспективой их практического применения. Эти искусственные среды представляют собой периодические диэлектрические структуры с периодом, сравнимым с длиной волны света. Одно из основных свойств ФК — наличие фотонных запрещенных зон (ФЗЗ), т.е. такого диапазона частот, с которыми свет не может распространяться через ФК. Именно наличие ФЗЗ и решеточно индуцированной дисперсии света дает возможность контролировать с помощью ФК скорость спонтанных переходов [1], замедлять свет [2], создавать микролазеры [3] и волноводы со сверхмалым радиусом изгиба [4], усиливать нелинейно-оптические эффекты [5].

Наиболее простой класс ФК — одномерные ФК, которые имеют периодичность только в одном направлении. Такие структуры в основном исследовались в геометрии Брэгга. Совсем недавно развитие методики изготовления многослойных ФК [6] позволило исследовать брэгговскую дифракцию света в ФК в схеме Лауэ. Актуальность таких исследований, выполненных в том числе в данной работе, связана с возможностью наблюдения явлений, прежде обнаруженных в традиционных кристаллах: маятниковый эффект [7] и эффект Бормана [8]. При помощи численного моделирования было показано, что оптический аналог маятникового эффекта может быть использован в качестве мультиплексора и оптического переключателя [9], а эффект Бормана для монохроматизации излучения [10]. Кроме того, в дифракционно-толстых ФК при брэгговской дифракции в схеме Лауэ была изучена динамика распространения фемтосекундных световых импульсов и открыт эффект временного деления лазерных импульсов [11].

Основная отличительная черта фотонно-кристаллических оптических устройств состоит в высоком контрасте показателей преломления таких периодических структур, определяемым, как разность показателей преломления структурных элементов $\Delta n = n_1 - n_2$ (например, для кремния с воздушными отверстиями $\Delta n \approx 3.5$), по сравнению с этой величиной для рентгеновского излучения ($\Delta n \approx 10^{-5}$). Оптические эффекты в условиях сильной модуляции показателя преломления могут проявлять новые свойства. Поэтому изучение маятникового эффекта и эффекта Бормана в ФК представляет значительный интерес. Актуальность соответствующих ис-

следований, помимо фундаментальной значимости, определяется возможностью практического использования этих эффектов.

В нелинейной оптике исследование брэгговской дифракции света в схеме Лауэ в ФК также представляется актуальным. Так, теоретически для ФК с низким контрастом показателей преломления была показана возможность синхронной генерации второй оптической гармоники (ГВГ), определены условия фазового синхронизма [12]. Однако анализа ГВГ в высококонтрастных ФК в условиях брэгговской дифракции в геометрии Лауэ не проводилось. Экспериментально ГВГ в таких структурах также не была исследована. Поскольку во многих случаях ГВГ происходит с использованием импульсного лазерного излучения, особый интерес представляет исследование ГВГ в условиях временного деления лазерных импульсов накачки.

Цель работы состояла в экспериментальном обнаружении и исследовании маятникового эффекта, эффекта Бормана и синхронной генерации второй оптической гармоники при распространении света в одномерных дифракционно-толстых ФК в условиях брэгговской дифракции в геометрии Лауэ. В рамках этой цели были сформулированы следующие задачи:

- Изготовление образцов ФК из пористого кремния и кварца для изучения маятникового эффекта и эффекта Бормана. Создание ФК на основе пористого кварца, обладающих квадратичной нелинейностью, путем внедрения нелинейно-оптического вещества.
- Исследование спектральных и поляризационных зависимостей маятникового эффекта в ФК из пористого кремния. Изучение управления этим эффектом путем нагрева ФК и с помощью светового излучения. Проведение моделирования распространения света через ФК, сравнение рассчитанных значений с экспериментальными результатами.
- Исследование эффекта Бормана в ФК из частично окисленного пористого кремния и пористого кварца в зависимости от соотношения между периодом структуры и длиной волны света. Расчет параметров ФК и изготовление образцов с этими параметрами для изучения влияния закрытия щели между изочастотными дисперсионными кривыми света на пропускание излучения ФК. Исследование различия пропускания света ФК в зависимости от того, в слоях с высоким или низким показателем преломления происходят потери света. В первом случае потери реализуются за счет поглощения излучения, во втором случае за счет рассеяния коротковолнового излучения.
- Исследование выполнения фазового синхронизма для ГВГ в ФК при варьировании толщин слоев структуры с фиксированным периодом. Определение параметров структуры для реализации фазового синхронизма и изготовление образцов ФК с этими параметрами. Экспериментальное изучение спектральных, угловых и поляризационных

зависимостей синхронной ГВГ в ФК. Экспериментальное исследование влияния эффекта временного деления лазерных импульсов на ГВГ в ФК. Моделирование ГВГ в ФК.

Обоснованность и достоверность

Эксперименты, выполненные в рамках диссертационной работы, были повторены многократно, результаты экспериментов продемонстрировали хорошую воспроизводимость. Исследования проводились на современном научном оборудовании. Все измерительные приборы были откалиброваны и протестированы. Полученные в экспериментах величины количественно согласуются с результатами расчетов, проведенных с использованием нескольких полуаналитических и численных методов: теории связанных волн, метода Сакоды для расчета ГВГ в ФК, линейного и нелинейного методов конечных разностей во временной области. Результаты, изложенные в диссертационной работе, неоднократно представлялись на международных и российских конференциях по проблемам, связанным с тематикой диссертационной работы, обсуждались на тематических семинарах, опубликованы в международных и российских научных журналах.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- Экспериментально обнаружен маятниковый эффект в дифракционно-толстых одномерных фотонных кристаллах из пористого кремния при брэгговской дифракции лазерного излучения в схеме Лауэ и исследованы зависимости этого эффекта от длины волны и поляризации света. Впервые продемонстрировано оптическое переключение маятникового эффекта при изменении температуры ФК и при внешнем оптическом воздействии.
- Обнаружен оптический аналог эффекта Бормана в одномерных фотонных кристаллах из частично окисленного пористого кремния и пористого кварца в схеме Лауэ. Впервые показано, что вид частотно-угловых спектров коэффициента пропускания света ФК в геометрии Лауэ определяется пространственным распределением потерь излучения в структуре.
- Впервые показано, что вырождение щели между изочастотными дисперсионными кривыми света в ФК при эффекте Бормана приводит к 1) шахматному порядку в распределении максимумов в спектрально-угловой зависимости коэффициента пропускания света ФК и 2) сильному угловому сужению этих максимумов.
- Впервые экспериментально и теоретически изучена синхронная генерация второй оптической гармоники при брэгговской дифракции лазерного излучения в схеме Лауэ в одномерных ФК в зависимости от соотношения толщин слоев в элементарной ячейке ФК.

- Изучено влияние эффекта временного деления лазерных импульсов на синхронную ГВГ в ФК в геометрии Лауэ.

Практическая значимость представленных результатов заключается в развитии подходов к управлению и генерации светового излучения при помощи ФК. Экспериментально показано, что маятниковый эффект позволяет контролируемо перераспределять излучение между двумя дифракционными максимумами, изменяя температуру ФК, подвергая ФК внешнему световому воздействию, изменяя длину волны и поляризацию света. Поэтому при брэгговской дифракции излучения в геометрии Лауэ ФК может действовать как полностью оптический переключатель и в качестве поляризационного и спектрального делителя излучения.

Обнаруженная зависимость коэффициента пропускания света ФК от угла падения и длины волны излучения перспективна в применении такого ФК для пространственной фильтрации световых пучков и их монохроматизации.

В работе показано, что выбором правильного соотношения между толщинами слоев в элементарной ячейке ФК можно реализовать фазовый синхронизм для генерации второй оптической гармоники в одномерном ФК при брэгговской дифракции света в геометрии Лауэ. Это имеет важное практическое значение для материалов, которым не свойственен фазовый синхронизм, но который может быть реализован в периодической структуре, составленной из этих материалов.

Защищаемые положения:

- В дифракционно-толстых одномерных фотонных кристаллах из пористого кремния при брэгговской дифракции света в геометрии Лауэ наблюдается так называемый маятниковый эффект. Мощность излучения нулевого и первого дифракционных максимумов света, вышедшего из фотонного кристалла, изменяются периодически с перестройкой длины волны.
- При брэгговской дифракции света в геометрии Лауэ в одномерных ФК из пористого кремния нагрев структуры вызывает переключение излучения из одного дифракционного максимума в другой из-за термооптических свойств пористого кремния.
- При брэгговской дифракции света в геометрии Лауэ в одномерных фотонных кристаллах из частично окисленного пористого кремния и пористого кварца наблюдается эффект Бормана.
- В фотонных кристаллах с потерями излучения в слоях с высоким и низким показателями преломления угловая зависимость коэффициента пропускания света различна: в первом случае наблюдаются

резкие максимумы пропускания света вблизи брэгговских углов падения, во втором случае при увеличении угла падения света наблюдается спад пропускания без резких максимумов.

- В геометрии Лауэ в одномерных фотонных кристаллах с потерями света в слоях с высоким показателем преломления наблюдается шахматный порядок и сужение максимумов в спектрально-угловой зависимости коэффициента пропускания света.
- При брэгговской дифракции в геометрии Лауэ в одномерных фотонных кристаллах выполнение условия фазового синхронизма для мод на основной и удвоенной частотах достигается путем выбора соотношения толщин слоев в элементарной ячейке фотонного кристалла.
- При брэгговской дифракции в геометрии Лауэ в одномерных фотонных кристаллах на основе пористого кварца с нитритом натрия в порах, возможно наблюдение синхронной генерации второй оптической гармоники.
- Зависимость мощности второй гармоники от длительности падающего лазерного импульса накачки при синхронном взаимодействии двух мод света на основной частоте и одной моды на удвоенной частоте может иметь максимум, обусловленный различием групповых скоростей взаимодействующих мод.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертационной работе, за исключением картин растровой электронной микроскопии и измерений низкотемпературной адсорбции азота, получены автором лично в "Лаборатории нелинейной оптики наноструктур и фотонных кристаллов" на кафедре квантовой электроники Физического факультета Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова. Автором проведены экспериментальные исследования, численные расчеты и моделирования, написаны коды компьютерных программ: 1) метод матриц распространения для расчета спектров прохождения и отражения света одномерных фотонных кристаллов в геометрии Брэгга, 2) метод связанных волн для расчета распространения света через одномерные и двумерные фотонные кристаллы в геометрии Лауэ, 3) нелинейный метод связанных волн и 4) метод Сакоды для расчета генерации второй оптической гармоники в фотонных кристаллах, 5) модификация исходных кодов программы МЕЕР для расчета генерации второй гармоники в приближении неистоающей накачки методом конечных разностей во временной области. Также проводилось моделирование генерации второй гармоники на суперкомпьютере Ломоносов с использованием написанной программы.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в печатных работах, список которых приводится в конце автореферата, в том числе в 8 публикациях в ведущих российских и зарубежных реферируемых

журналах: Optics Letters, Physical Review B, Journal of Applied Physics, Proceedings of SPIE, Crystals, Journal of Russian Laser Research, Ученые записки физического факультета Московского Университета, Журнал прикладной спектроскопии.

Апробация работы. Результаты работы представлены в докладах на 14 российских и международных конференциях:

- Optics + Optoelectronics 2017 (Прага, Чехия)
- Физика.СПб 2017 (Санкт-Петербург, Россия)
- XXIV международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» 2017 (Москва, Россия)
- VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике 2017 (Москва, Россия)
- VIII Международный научный семинар и VI Международная молодежная научная школа-семинар "Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики" (Великий Новгород, Россия)
- ICONO/LAT 2016 (Минск, Белоруссия)
- Laser Optics 2016 (Санкт-Петербург, Россия)
- XXIII международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» 2016 (Москва, Россия)
- CLEO/Europe-EQEC 2015 (Мюнхен, Германия)
- Nonlinear Photonics: Theory, Materials, Applications 2015 (Санкт-Петербург, Россия)
- XXII международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» 2015 (Москва, Россия)
- Frontiers in Optics 2014 (Тусон, Аризона, США)
- Школа-семинар «Волны-2013» (Можайск, Россия)
- ICONO-LAT 2013 (Москва, Россия)

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитированной литературы. Работа состоит из 175 страниц и содержит 75 иллюстраций, 6 таблиц и 181 библиографическую ссылку.

Содержание работы

Во **Введении** описывается актуальность диссертационной работы, формулируются цели и задачи работы, отмечается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приводятся выносимые на защиту положения и сведения о публикациях результатов работы, их апробации, а также о структуре диссертации.

Глава 1 «Обзор литературы». В §1.1 приведен обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных изучению ряда эффектов, возникающих при дифракции света в фотонных кристаллах (ФК) и рентгеновского излучения в кристаллах. Большим достижением динамической теории дифракции было предсказание двух эффектов, возникающих при брэгговской дифракции рентгеновского излучения в кристаллах в геометрии Лауэ [13]: 1) маятниковый эффект — периодический обмен энергией между прямой и дифрагированной волнами внутри кристалла [7] и 2) эффект Бормана — аномально высокое пропускание излучения кристаллом [14].

Эти эффекты наблюдались не только в рентгеновском диапазоне; в оптике эффект Бормана изучался в тонких голограммах [15, 16], а маятниковый эффект в дифракционно-тонких структурах в оптической и СВЧ области спектра [17–19]. Благодаря большому контрасту показателей преломления в искусственных структурах предлагалось использовать маятниковый эффект для управления световым излучением [20, 21].

В §1.2 приводится описание процесса электрохимического травления кремния [22] и формирования пористого кварца [22] для получения оптических структур из этих материалов, рассматриваются протекающие реакции и механизмы формирования пор. В разделе 1.2.3 рассмотрены основные свойства фотолюминесценции пористого кремния. В разделе 1.2.4 приводятся основные модели для описания оптических свойств композитных сред, применяемых в оптике пористых кремния и кварца.

В §1.3 описана ГВГ в объемных средах и приведены основные экспериментальные подходы к ГВГ при помощи периодических структур: реализация квазисинхронизма, модификация решеточной дисперсии света, использование двулучепреломления обусловленного формой, использование микрорезонаторов, подавление дифракционного расплывания.

Теоретические и численные методы расчета распространения света и генерации второй оптической гармоники в ФК приводятся в §1.4. В разделах 1.4.1 и 1.4.2 описаны методы расчета линейного взаимодействия света с ФК: 1) метод матриц распространения для расчета спектров прохождения и отражения света одномерных фотонных кристаллов в геометрии Брэгга [23], 2) метод связанных волн для расчета распространения света через одномерные и двумерные фотонные кристаллы в геометрии Лауэ [24]. В разделах 1.4.3 и 1.4.4 описаны методы расчета генерации ВГ в ФК в геометрии Лауэ: 1) нелинейный метод связанных волн [25] и 2) метод Сакоды [26]. В разделе 1.4.5, на примере частного случая для ТЕ поляризации света,

приводится метод конечных разностей во временной области (FDTD), его дисперсионные свойства и некоторые важные особенности моделирования. Здесь же кратко рассмотрено применение метода FDTD для решения задач нелинейной оптики.

Глава 2 «Маятниковый эффект в одномерных фотонных кристаллах при брэгговской дифракции в геометрии Лауэ». Глава посвящена исследованию маятникового эффекта в дифракционно-толстых ФК при брэгговской дифракции света в геометрии Лауэ.

В §2.1 рассматриваются методики изготовления ФК на основе пористого кремния и пористого кварца. Приведена схема экспериментальной установки электрохимического травления пластин р-легированного кремния, параметры электролита и используемых плотностей тока, а также параметры термического окисления для получения структур из пористого кварца. В диссертационной работе слои, полученные при плотности тока $j_1 = 40 \text{ мА/см}^2$, названы "тяжелыми", а слои, полученные при $j_2 = 200 \text{ мА/см}^2$ — "легкими". Это связано с тем, что сформированные при j_1 слои имели показатель преломления больше чем слои, образованные при j_2 .

В разделах 2.1.2 и 2.1.3 приведены результаты характеристики, получаемых ФК. Использовались следующие методы определения параметров ФК: 1) растровая электронная микроскопия для изучения внутреннего устройства слоев ФК, 2) низкотемпературная адсорбция азота для исследования распределения пор по размерам и определения пористостей слоев, 3) спектроскопия коэффициентов отражения и прохождения света через ФК для определения пористостей (p), показателей преломления (n), толщин слоев (d). Показано, что а) значения пористостей тяжелых и легких слоев из пористого кремния составляют $p_1 = 0.631$ и $p_2 = 0.803$, соответственно, б) при термическом окислении каркас пористого материала сохраняется, в) величины пористостей при окислении уменьшаются на 11% и 5% для тяжелых и легких слоев, соответственно, г) толщины слоев при окислении увеличиваются на 12% из-за расширения кремния при окислении.

В §2.3 приведены результаты исследования маятникового эффекта в одномерном дифракционно-толстом ФК при брэгговской дифракции излучения в геометрии Лауэ. Изучены спектральные и поляризационные особенности эффекта, а также продемонстрировано регулирование направления распространения света с помощью маятникового эффекта. Исследования проводились для ФК из пористого кремния со следующими параметрами: 1) число слоев 720, 2) толщины каждого слоя $d_{1,2} = 600 \text{ нм}$, 3) показатели преломления на длине волны излучения 1150 нм $n_1 = 1.77$, $n_2 = 1.32$, 4) длина ФК $L = 960 \text{ мкм}$.

В экспериментальной установке (§2.2) холостой луч параметрического генератора света (ПГС) после пространственной фильтрации фокусировался линзой с фокусным расстоянием $f = 3 \text{ см}$ на торец ФК. Лазерная система генерировала световые импульсы длительностью 10 нс в диапазоне $\lambda = 490 - 1200 \text{ нм}$ со спектральной шириной $\delta\lambda \approx 0.5 \text{ нм}$ и частотой

повторения 10 Гц. Пиковая мощность излучения в фокусе линзы не превышала 1 ГВт/см^2 . Свет падал под углом $\theta = 28.6^\circ$, равным углу Брэгга для света с длиной волны 1150 нм. Также имелась возможность управлять температурой ФК при помощи электрического нагревателя или подсветкой сигнальным пучком ПГС.

При указанных параметрах эксперимента измерение углового распределения интенсивности света, прошедшего через ФК, показывает, что в структуре происходит брэгговская дифракция света: излучение, выходящее из ФК, образует два пучка (Т и D) соответствующих нулевому и первому порядкам дифракции [рис. 1(а)]. Измерения спектральных зависимостей мощности излучения в Т- и D- пучках проводилось в ближнем ИК диапазоне (1125 – 1146 нм), в котором пористый кремний прозрачен. При изменении длины волны света мощность излучения в Т- и D- пучках демонстрирует осциллирующее поведение [рис. 1(б)]. Причем изменение

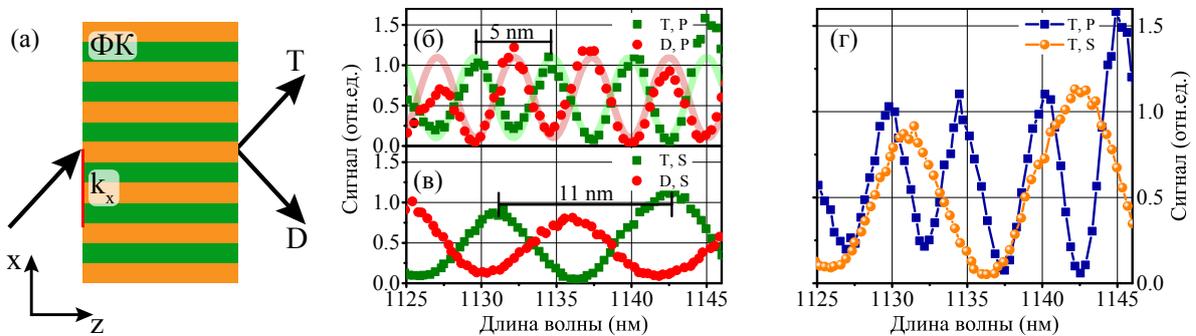


Рис. 1. а) Дифракции света в ФК в схеме Лауэ. Спектральные зависимости регистрируемого сигнала в прямом (Т) и дифрагированом (D) лучах при б) р-, в) s-поляризации падающего излучения. г) Сравнение спектральных зависимостей для прямого луча при р- и s-поляризациях падающего света.

мощности в двух пучках происходит в противофазе, что говорит о наблюдении маятникового эффекта — обмене энергией между волнами нулевого и первого порядков дифракции в ФК.

Показано, что периоды осцилляций ($\Delta\lambda$) отличаются для s- и р-поляризованного света: $\Delta\lambda = 11 \text{ нм}$ при s-поляризации, $\Delta\lambda = 5 \text{ нм}$ при р-поляризации [рис. 1(б), 1(в)]. Проведенные расчеты на основе теории связанных волн подтверждают экспериментально полученные значения $\Delta\lambda$ и их различие для s- и р-поляризаций.

На основе поляризационной зависимости спектральных периодов $\Delta\lambda$ показано, что при длине волны света $\lambda = 1142 \text{ нм}$ образец ФК действует как поляризационный делитель света: s-поляризованное излучение направляется в Т-пучок, р-поляризованное — в D-пучок [рис. 1(г)].

В разделе 2.3.2 экспериментально продемонстрировано управление мощностью излучения, выходящего из ФК, при помощи маятникового эффекта и термооптических свойств пористого кремния. Показано, что нагрев ФК сдвигает спектральные зависимости мощности излучения в Т- и

D- пучках в область бóльших длин волн. При этом изменение температуры ФК на $\Delta T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ приводит к оптическому переключению — перенаправлению излучения из одного пучка в другой. Расчеты, выполненные на основе теории связанных волн и модели эффективной среды Бруггемана для оценки термооптических свойств пористого кремния, предсказывают близкое значение температуры переключения $\Delta T = 24^\circ\text{C}$.

В разделе 2.3.2 также было показано, что сдвиг спектральной зависимости мощности излучения T- и D-пучков можно осуществлять полностью оптически. При облучении ФК сбоку излучением сигнального пучка ПГС с длиной волны $\lambda = 518 - 521$ нм и средней мощностью 8.4 мВт спектральная зависимость сдвигается на четверть периода. Сдвиг происходит из-за нагрева ФК при поглощении света сигнального пучка.

В разделе 2.3.3 анализируется природа маятникового эффекта и приводятся сравнения экспериментально полученных результатов с результатами расчета на основе теории связанных волн. Показано, что маятниковый эффект возникает из-за того, что при падении света под углом Брэгга на ФК в структуре возбуждается нескольких электромагнитных (ЭМ) мод с различными константами распространения $q_z^{(\gamma)}$, где γ -номер моды. Интерференция этих мод приводит к периодическому обмену энергией между волнами нулевого и первого порядков дифракции в ФК с полупериодом $\Lambda_{ex} = \pi / (q_z^{(1)} - q_z^{(2)})$, называемым длиной экстинкции. Из-за большого контраста показателей преломления слоев ($\Delta n = 0.45$) длина экстинкции весьма мала $\Lambda_{ex} \approx 2.19$ мкм (для s-поляризации), а рассматриваемый ФК является дифракционно-толстым (т.е. $L/\Lambda_{ex} \approx 440 \gg 1$) и поэтому для оптического переключения достаточно изменения Λ_{ex} всего лишь на 0.23%.

Глава 3 «Эффект Бормана в одномерных фотонных кристаллах при брэгговской дифракции в геометрии Лауэ». В главе приводятся результаты исследования эффекта Бормана в одномерных ФК в схеме Лауэ.

Экспериментальные исследования проводились на ФК, разделенных на три группы в зависимости от типа слоев, ослабляющих свет, и величины периода структуры. В разделе 3.1.1 указаны параметры образцов. В первой группе образцов (ФК-I), изготовленных из пористого кварца потери света происходили преимущественно в легких слоях за счет рэлеевского рассеяния излучения с малой длиной волны ($\lambda = 405$ нм) на порах. Для изучения влияния соотношения периода структуры и длины волны излучения на пропускание света ФК были исследованы структуры с периодами $d_{Ia} = 400$ нм и $d_{Iб} = 810$ нм, обозначаемые далее ФК-Ia и ФК-Iб, соответственно. Вторая группа образцов (ФК-II) содержала ФК из частично окисленного пористого кремния, поэтому потери света имели место в тяжелых слоях за счет поглощения излучения остаточным кремнием, противоположно ситуации в ФК-I. Исследования пропускания света ФК-II проводились для структур с периодами $d_{IIa} = 635$ нм и $d_{IIб} = 1270$ нм, обозначаемых далее ФК-IIa и ФК-IIб, соответственно. Для ФК-II применялось излучение с длиной волны $\lambda = 635$ нм, чтобы уменьшить влияние рэлеевского рассея-

ния. Две группы ФК использовались для исследования эффекта Бормана и обнаружения различия пропускания света структурами с потерями излучения в тяжелых и легких слоях. ФК-III был также изготовлен из частично окисленного пористого кремния и имел период $d_{III} = 2900$ нм. ФК-III использовался для проведения исследований зависимости эффекта Бормана от длины волны света. Период ФК-III был специально рассчитан с тем, чтобы длина волны излучения, при которой происходит закрытие щели между двумя изочастотными кривыми света в ФК, попадала в область спектральной перестройки излучения титан-сапфирового лазера ($\lambda = 720 - 890$ нм), примененного для исследования прохождения света через ФК-III.

Детальная характеристика световых потерь в пористом кварце и частично окисленном пористом кремнии представлена в §3.2 и §3.3 диссертации. Для этого выполнен анализ спектров пропускания однородных пластин и многослойных структур из этих материалов, а также проведена микроскопия фотолюминесценции. Результаты этих исследований позволили определить значения световых потерь при рассеянии излучения на порах и при поглощении излучения остаточным кремнием. Так мнимые части показателей преломления имели следующие значения: $Im(n_1(400 \text{ нм})) = 5 \cdot 10^{-5}$, $Im(n_2(400 \text{ нм})) = 8 \cdot 10^{-4}$ - для ФК-I; $Im(n_1(635 \text{ нм})) = 8 \cdot 10^{-4}$, $Im(n_2(635 \text{ нм})) = 5 \cdot 10^{-5}$ - для ФК-II и $Im(n_1(800 \text{ нм})) = 1.6 \cdot 10^{-3}$. $Im(n_2(800 \text{ нм})) \approx 0$ - для ФК-III.

В §3.4 приводятся экспериментальные и теоретические результаты исследования эффекта Бормана в описанных структурах. В экспериментальной установке лазерное излучение фокусировалось в схеме Лауэ на торец ФК и регистрировалась полная мощность вышедшего из ФК излучения, включая все дифракционные максимумы.

Исследование зависимости коэффициента пропускания излучения ФК-Ia и ФК-IIa с периодами, приблизительно равными длине волны падающего света (405 нм и 635 нм, соответственно), от угла падения позволило экспериментально обнаружить оптический аналог эффекта Бормана (раздел 3.4.1), проявлявшийся в увеличении пропускания света двумя ФК при падении излучения на структуру под углом Брэгга 30° (рис. 2). Максимальное увеличение коэффициента пропускания достигало шестидесятикратного значения по сравнению с нормальным падением света на ФК. Анализ природы эффекта Бормана и его численное моделирование представлены в разделе 3.4.2.

В разделе 3.4.3 показано, что кривые углового пропускания света ФК из первой и второй групп при увеличении периода структур в два раза сильно различаются (рис. 3), тогда как для ФК с первоначальными периодами кривые углового пропускания сходны (рис. 2). Так для ФК-Iб коэффициент пропускания убывал с увеличением угла падения излучения без явно выраженных максимумов [рис. 3(а)], а для ФК-IIб наблюдались [рис. 3(б)]: 1) максимумы пропускания света при брэгговских углах падения, а также при нормальном падении излучения, 2) строгое чередование узких максимумов с большой амплитудой и широких максимумов с малой

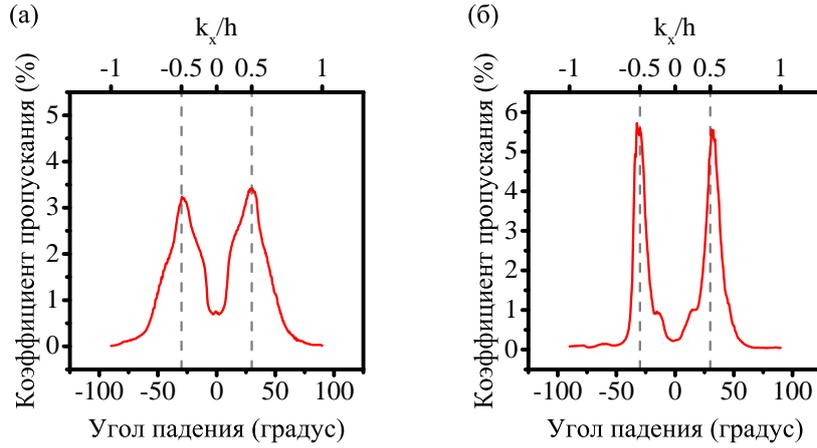


Рис. 2. Угловая зависимость коэффициентов пропускания s-поляризованного света а) ФК-Ia при длине волны излучения $\lambda = 405$ нм и б) ФК-IIa при длине волны $\lambda = 635$ нм. k_x - тангенциальная компонента волнового вектора падающей волны, h - длина вектора обратной решетки ФК.

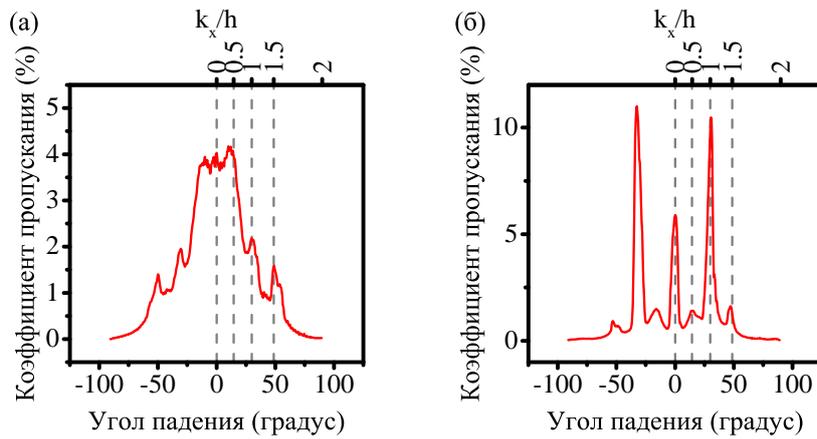


Рис. 3. Угловая зависимость коэффициента пропускания s-поляризованного света а) ФК-Iб при длине волны излучения $\lambda_I = 405$ нм и б) ФК-IIб при длине волны $\lambda_{II} = 635$ нм. k_x - тангенциальная компонента волнового вектора падающей волны, h - длина вектора обратной решетки ФК.

амплитудой. Численное моделирование прохождения света через ФК-Iб и ФК-IIб подтвердило наблюдаемые особенности.

Указанные особенности могут быть усилены подбором периода ФК и длины волны излучения падающего на структуру. Для этого в разделе 3.4.4 представлено исследование аномалий пропускания света ФК-III ($d = 2900$ нм) с поглощением в слоях с высоким показателем преломления в зависимости от длины волны излучения. На рисунках 5, 4(a) приведены экспериментальные и теоретические спектрально-угловые зависимости коэффициента пропускания света ФК-III. Максимумы коэффициента пропускания возникают при брэгговских углах, а также при нулевом угле

падения света, что соответствует значениям тангенциальной компоненты волнового вектора падающей на ФК волны $k_x = h/2 \cdot m$, $m = 0, \pm 1, \dots$. Число максимумов пропускания, как и количество углов Брэгга, увеличивается с уменьшением длины волны света при этом наблюдается: 1) сильное угловое сужение максимумов пропускания света при длинах волн λ^* ; в эксперименте зарегистрировано трехкратное уменьшение угловой ширины максимумов при длине волны $\lambda^* = 808$ нм, 2) "шахматный" порядок в распределении максимумов пропускания; при одних длинах волн максимумы коэффициента пропускания света наблюдаются, если тангенциальная компонента волнового вектора падающей на ФК волны $k_x = h/2 \cdot m$ и m -четное число, при других длинах волн — когда m -нечетное число. Путем

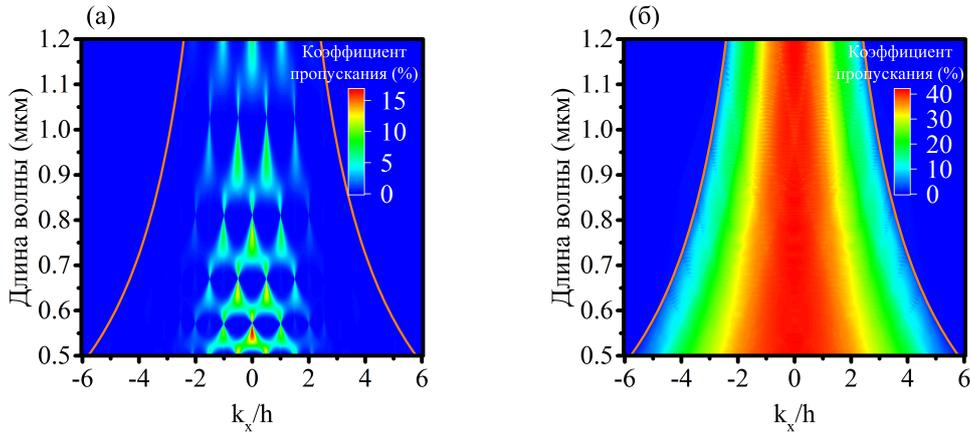


Рис. 4. а) Рассчитанные спектрально-угловые зависимости коэффициента пропускания s-поляризованного света а) ФК-III, б) ФК-IV. $k_x = 2\pi/\lambda \cdot \sin(\theta)$ - тангенциальная компонента волнового вектора падающей волны, θ - угол падения света на ФК, h - длина вектора обратной решетки ФК. Оранжевые кривые указывают световые линии излучения в воздухе т.е $\lambda = 2\pi/k_x$.

расчетов изочастотных кривых света в ФК-III установлено, что эти особенности связаны с вырождениями щели между изочастотными кривыми при длинах волн λ^* . В разделе 3.4.5. получены аналитические выражения для частот света, при которых происходит вырождение щели. В разделе 3.4.6 показано, что на этих длинах волн происходит топологический переход, при котором четность функции пространственного распределения напряженности электрического поля в ФК изменяется на противоположную.

Отмеченный выше [рис. 3(а)] спад пропускания света при увеличении угла падения излучения на ФК с достаточно большим периодом и с потерями света в легких слоях наглядно проиллюстрирован на рисунке 4(б). На рисунке приведена рассчитанная спектрально-угловая зависимость коэффициента пропускания гипотетического ФК-IV, отличающегося от ФК-III тем, что поглощающими являются легкие слои. Видно, что в этом случае пропускание не имеет каких-либо особенностей в отличие от результатов для ФК-III. Таким образом, продемонстрировано кардинальное различие пропускания ФК с потерями света в тяжелых и легких слоях.

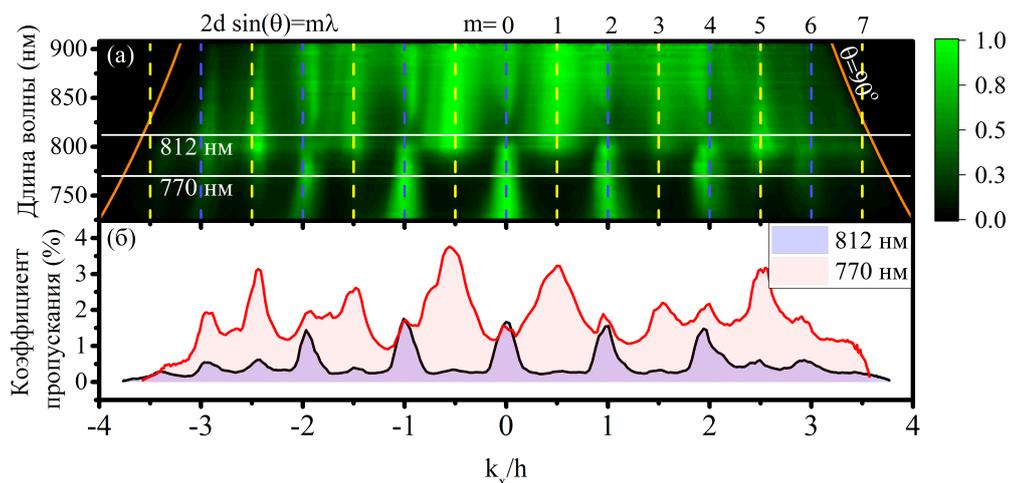


Рис. 5. а) Экспериментальная спектрально-угловая зависимость нормированного коэффициента пропускания ФК-III для s-поляризованного света, б) экспериментальная угловая зависимость коэффициента пропускания ФК-III для длин волн света 770 нм и 812 нм.

В разделе 3.4.6 показано, что это различие связано с тем, что пропускание ФК-IV определяется преимущественно волноводными модами света, коэффициент затухания которых практически не изменяется с углом падения, а пропускание ФК-III определяется одной модой, коэффициент затухания которой увеличивается на 85% при нарушении условий брэгговской дифракции.

Таким образом в главе изучено пропускание света ФК с периодически распределенными потерями и экспериментально обнаружен оптический эффект Бормана. Экспериментально и теоретически показано, что угловые зависимости коэффициента пропускания света ФК с потерями излучения в слоях с высоким и низким показателями преломления зависят от соотношения между периодом структуры и длиной волны падающего света. Так для используемых ФК с периодом, равным длине волны падающего света, кривые углового пропускания имеют характерные особенности: минимум пропускания при нулевом угле падения и максимум при брэгговском угле. Однако если периоды ФК равны двум длинам волн света, кривые углового пропускания двух ФК имели принципиально различный характер. На примере ФК с большим периодом было показано, что спектрально-угловые зависимости коэффициента пропускания света могут демонстрировать такие особенности как шахматный порядок в расположении максимумов и их угловое сужение.

Глава 4 «Генерация второй оптической гармоники в одномерных фотонных кристаллах при брэгговской дифракции в геометрии Лауэ».

В §4.1 описана методика создания ФК с оптической нелинейностью. Показано, что внедрение нитрита натрия из раствора этого сегнетоэлектрика в поры ФК из пористого кварца обеспечивает квадратичную восприимчивость ФК для наблюдения ГВГ. В работе использовались ФК со

степенью заполнения пор $8 \cdot 10^{-3}$, что приводило к увеличению показателей преломления слоев пористого кварца на $\delta n_1 = 1.6 \cdot 10^{-3}$ и $\delta n_2 = 2.3 \cdot 10^{-3}$ для тяжелых и легких слоев, соответственно, по сравнению с этими величинами до заполнения.

В §4.2 показано, что в одномерном ФК из пористого кварца с нитритом натрия в порах можно выполнить условие фазового синхронизма для ГВГ при брэгговской дифракции излучения накачки в геометрии Лауэ путем выбора соотношения толщин слоев в элементарной ячейке ФК при фиксированном периоде $d = 905$ нм [рис. 6(а)]. Такой подход позволяет

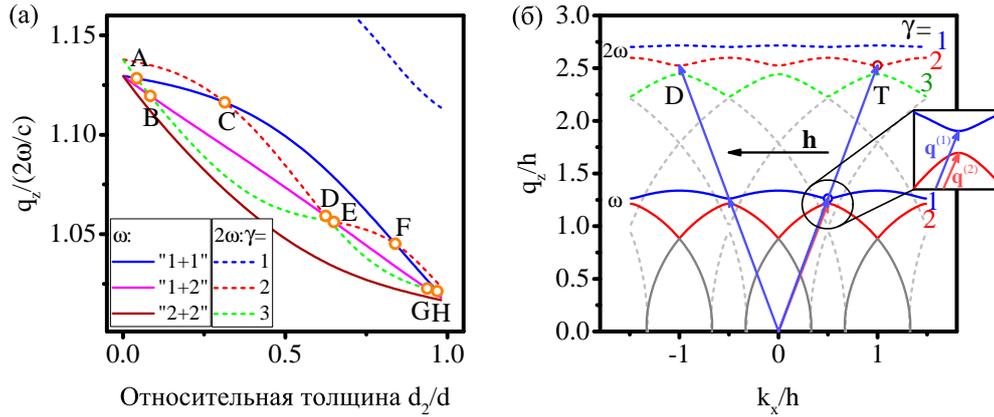


Рис. 6. а) Зависимость эффективных показателей преломления ТМ-мод ВГ $q_z^{(\gamma)}(2\omega, k_x = h)/(2\omega/c)$, $\gamma = 1, 2, 3$ (пунктирные кривые) и волн нелинейной поляризации $\left(q_z^{(\gamma_1)}(\omega, k_x = h/2) + q_z^{(\gamma_2)}(\omega, k_x = h/2) \right)/(2\omega/c)$, $\gamma_1 = 1, 2$, $\gamma_2 = 1, 2$ (сплошные кривые) от относительной толщины легкого слоя ФК d_2/d . Пересечение пунктирных и сплошных кривых (цветные точки) соответствует выполнению фазового синхронизма ГВГ. б) Изочастотные кривые накачки ($\lambda = 800$ нм, сплошные кривые) и ВГ ($\lambda = 400$ нм, пунктирные кривые) в ФК, соответствующему С-синхронизму. Индекс γ - порядковый номер моды.

компенсировать материальную дисперсию слоев ФК за счет изменения решеточной дисперсии света в структуре. Существует восемь геометрий элементарной ячейки, обеспечивающих синхронную ГВГ, обозначенных буквами (А-Н) на рисунке 6(а). Их можно разделить на две группы в зависимости от того, одна или две различные моды накачки участвуют в синхронном нелинейном процессе.

Векторная схема фазового синхронизма "С" приведена на рисунке 6(б). Здесь мода накачки с номером $\gamma_{1,2} = 1$ возбуждает моду ВГ с $\gamma = 2$ за счет квадратичной нелинейности. Достигая выходной грани ФК, эта мода ВГ формирует прямую (Т) и дифрагированную (D) волны в свободном пространстве за ФК.

Для исследования ГВГ в 1D ФК было изготовлено два ФК из пористого кварца, состоящие из 800 чередующихся слоев с пористостями $p_1 = 51\%$, $p_2 = 75\%$ (раздел 4.3.1). Толщины слоев ФК-I и ФК-II (таблица 0.1) выби-

Таблица 0.1. Параметры образцов ФК для исследования ГВГ. Тип синхронизма соответствует обозначениям на рисунке 6(а).

название ФК	толщины слоев		тип синхронизма
	d_1	d_2	
ФК-I	621 нм	284 нм	C
ФК-II	339 нм	566 нм	D

рались путем расчета, с тем, чтобы выполнялось условие фазового синхронизма при брэгговской дифракции излучения накачки в геометрии Лауэ. Тип синхронизма (правая колонка таблицы) соответствует обозначениям на рисунке 6(а). Исследования ГВГ проводились для двух синхронизмов (C, D) — по одному из разных групп. Слои ФК имели следующие значения показателей преломления на длине волны накачки $n_1(800 \text{ нм}) = 1.213$, $n_2(800 \text{ нм}) = 1.108$ и ВГ $n_1(400 \text{ нм}) = 1.221$, $n_2(400 \text{ нм}) = 1.112$.

В экспериментальной установке для исследования ГВГ (раздел 4.3.2) источником излучения служил титан-сапфировый лазер (Ti-Sa), перестраиваемый в диапазоне длин волн 720 – 890 нм. Длительность импульсов изменялась от 50 фс до 140 фс и контролировалась при помощи автокоррелометра. Излучение Ti-Sa лазера фокусировалось на торец ФК установленного на вращающемся столике, дающем возможность изменять угол падения света (θ) на ФК. На отдельной вращающейся платформе располагалась система регистрации излучения ВГ, позволяющая измерять индикатрисы ВГ.

Экспериментальное исследование ГВГ на образце ФК-I представлено в разделе 4.4.1. При падении лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 800 \text{ нм}$ на ФК-I в геометрии Лауэ под брэгговским углом $\theta = 26.2^\circ$ излучение ВГ, вышедшее из структуры, образует два пучка, сонаправленных Т- и D- пучкам накачки [рис. 7(а)]. Синхронность ГВГ подтверждается следующими свойствами нелинейного сигнала. Во-первых, нелинейный сигнал распространяется с очень малой угловой расходимостью; полная угловая ширина максимумов ВГ на полувысоте составляла 1.2° , что в 3.5 раза меньше угловой ширины максимумов накачки (4.2°). Во-вторых, имеется выраженная зависимость интенсивности ВГ от угла падения θ и длины волны света λ : отклонение пучка накачки с $\lambda = 800 \text{ нм}$ на 1.5° от брэгговского угла приводит к исчезновению максимумов ВГ [рис. 7(б)], аналогично изменение длины волны излучения падающего на ФК на $\Delta\lambda = 15 \text{ нм}$ при угле падения $\theta = 26.2^\circ$ приводит к спаду интенсивности ВГ до фоновых значений. В-третьих, величина спектральной отстройки $\Delta\lambda = 15 \text{ нм}$ соответствует отклонению пучка накачки от брэгговского угла на 0.5° , что в три раза меньше угловой отстройки, требуемой для прекращения ГВГ, при фиксированной длине волны накачки. Это различие объясняется тем, что при изменении длины волны лазерного излучения величина фазовой расстройки определяется сразу двумя вкладками: спектральной и угловой зависимостями констант распространения световых мод.

В разделе 4.4.2 экспериментально показано, что в случае ФК-II поми-

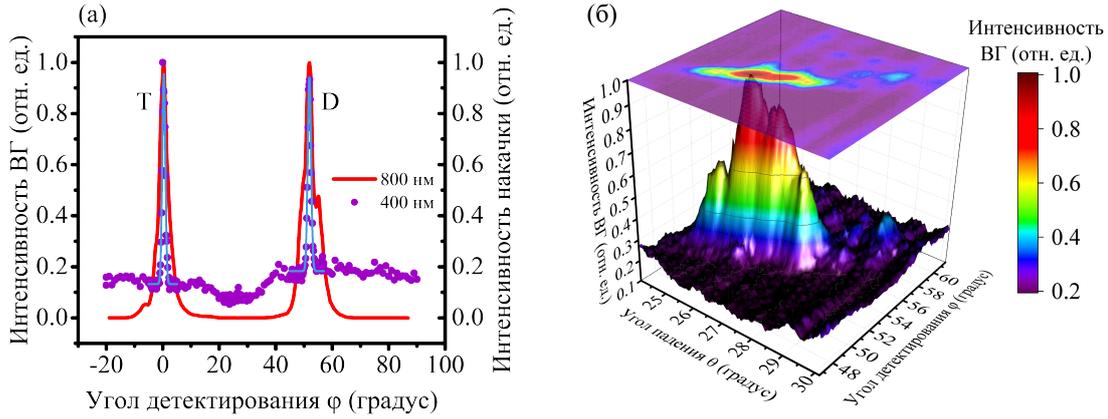


Рис. 7. а) Индикатрисы накачки и ВГ измеренные в условиях брэгговской дифракции излучения накачки с длиной волны $\lambda = 800$ нм и при угле падения света $\theta = 26.2^\circ$, б) зависимость интенсивности ВГ от угла падения излучения накачки (θ) и угла детектирования (ϕ) в D-пучке ВГ.

мо Т- и D-пучков ВГ присутствует центральный пучок, не наблюдающийся для ФК-I и не предсказанный теорией связанных волн. Объяснению причин появления центрального максимума ВГ посвящен раздел 4.4.3, в котором приведены результаты моделирования ГВГ световыми пучками конечной ширины. Моделирование ГВГ проводилось в приближении неистощающейся накачки с помощью разработанной компьютерной программы, реализующей нелинейный метод конечных разностей во временной области (FDTD). Для корректного проведения расчетов методом FDTD предложен критерий выбора шага сетки пространственной дискретизации, основанный на сравнении длины нелинейной структуры и когерентной длины, "навязанной" законом дисперсии света в этом численном методе. Также показано, что моделирование ГВГ методом FDTD требует очень малого шага сетки дискретизации, особенно для протяженных структур. Поэтому FDTD расчеты проводились на суперкомпьютере Ломоносов.

В результате моделирования ГВГ, анализа изочастотных кривых и пространственного распределения полей собственных мод ФК было показано, что в случае D-синхронизма может появляться центральный максимум в индикатрисах ВГ. Появление этого максимума связано с тем, что 1) ФК-II имел соотношение толщин слоев близкое к тому, при котором происходит вырождение щели между изочастотными кривыми ВГ. В этом случае распределение поля мод ВГ сильно меняется при небольшой отстройке угла падения накачки от брэгговского угла, а амплитуда волны, дающей центральный максимум, становится отличной от нуля; 2) пучок накачки имел достаточно широкий пространственный спектр.

В разделе 4.4.4 представлены экспериментальные и теоретические результаты исследования влияния эффекта дифракционно-индуцированного временного деления лазерных импульсов на ГВГ при синхронном взаимодействии двух ЭМ мод накачки с модой ВГ [D-синхронизм на рисунке 6(a)].

Путем решения неоднородного волнового уравнения для огибающей импульса ВГ, а также методом FDTD показано, что из-за различия значений групповых скоростей ЭМ мод зависимость мощности ВГ ($P^{2\omega}$), нормированная на квадрат мощности накачки (P^ω), может иметь максимум относительно длительности падающего на ФК лазерного импульса ΔT . Для проведения расчетов было получено выражение для величин групповых скоростей ЭМ мод ФК, позволяющее избежать численного дифференцирования закона дисперсии света. Для использованной структуры ФК-II экспериментальные зависимости $\eta = P^{2\omega}/P^{\omega^2}$ от ΔT хорошо согласуются с рассчитанными кривыми. Максимум нормированного нелинейного сигнала $\eta(\Delta T)$ наблюдался при длительности лазерных импульсов около $\Delta T = 60$ фс.

Заключение. В диссертационной работе изучено взаимодействие лазерного излучения с одномерными дифракционно-толстыми фотонными кристаллами при брэгговской дифракции света в геометрии Лауэ. Экспериментально и теоретически исследованы линейные и нелинейные оптические явления: маятниковый эффект, эффект Бормана и генерация второй оптической гармоники. Были получены следующие основные результаты:

1. Экспериментально обнаружен маятниковый эффект в одномерных фотонных кристаллах из пористого кремния при брэгговской дифракции лазерного излучения в геометрии Лауэ, заключающийся в периодическом обмене энергией между волнами нулевого и первого порядков дифракции внутри фотонного кристалла. Эффект приводит к осциллирующей спектральной зависимости мощности излучения в прямом и дифрагированном пучках.
2. Экспериментально установлена зависимость маятникового эффекта от поляризации падающего света. Показано, что для фотонного кристалла из пористого кремния с показателями преломления слоев $n_1 = 1.77$, $n_2 = 1.32$, толщинами $d_{1,2} = 600$ нм и длиной $L = 960$ мкм, период спектральных осцилляций в s-поляризованном свете составляет $\Delta\lambda = 11$ нм и $\Delta\lambda = 5$ нм в r-поляризованном свете для спектрального диапазона $\lambda = 1125 - 1145$ нм. Различие периодов связано с разными коэффициентами отражения Френеля на границе между слоями фотонного кристалла для двух поляризаций света.
3. Экспериментально показано, что, благодаря термооптическим свойствам пористого кремния, можно управлять мощностью излучения в дифракционных пучках путем нагрева фотонного кристалла. Оптическое переключение, т.е. перенаправление излучения из одного дифракционного пучка в другой, для используемой структуры происходило при изменении температуры на 20°C .
4. Экспериментально обнаружен оптический аналог эффекта Бормана в фотонных кристаллах из пористого кварца и из частично-окисленного пористого кремния. Эффект проявляется увеличением коэффициента пропускания света фотонными кристаллами при падении излучения под углом Брэгга в геометрии Лауэ.

5. Экспериментально и теоретически показано, что зависимость пропускания света одномерными фотонными кристаллами от угла падения излучения в схеме Лауэ может существенно отличаться для двух структур с потерями света в слоях 1) с высоким и 2) с низким значениями показателя преломления при достаточно большом периоде кристалла. В первом случае могут наблюдаться узкие максимумы коэффициента пропускания света вблизи брэгговских углов падения; во втором случае максимумы практически не выражены, наблюдается плавный спад пропускания с ростом угла падения.
6. Экспериментально и теоретически обнаружено, что в спектрально-угловых зависимостях коэффициента пропускания света фотонным кристаллом с потерями излучения в слоях с высоким показателем преломления наблюдается: 1) шахматный порядок в положении максимумов коэффициента пропускания, 2) угловое сужение максимумов пропускания в окрестности некоторых длин волн λ^* . При помощи теории связанных волн показано, что эти особенности связаны с закрытием щели между изочатотными кривыми при длинах волн λ^* .
7. При помощи теории связанных волн рассмотрены условия фазового синхронизма для генерации второй оптической гармоники в одномерных фотонных кристаллах из пористого кварца при брэгговской дифракции излучения накачки в геометрии Лауэ. Показано, что фазовый синхронизм реализуется для различного соотношения толщин слоев в элементарной ячейке фотонного кристалла. Обнаруженные синхронизмы разделяются на две группы в зависимости от того, одна или две различные моды накачки участвуют в синхронном нелинейном процессе.
8. Экспериментально обнаружена синхронная генерация второй гармоники для одного синхронизма из каждой группы. Экспериментально и теоретически исследовано влияние эффекта временного деления лазерных импульсов на генерацию второй гармоники. Показано, что при взаимодействии двух мод на основной частоте и моды на удвоенной частоте различие групповых скоростей мод в фотонном кристалле приводит к появлению максимума в зависимости нелинейного сигнала от длительности падающего лазерного импульса накачки.
9. Изучена генерация второй гармоники световым пучком конечного радиуса. Для этого при помощи разработанной компьютерной программы методом конечных разностей во временной области в приближении неистоающей накачки проведено моделирование генерации второй гармоники в одномерном фотонном кристалле при брэгговской дифракции пучка накачки в геометрии Лауэ с использованием ресурсов суперкомпьютера Ломоносов. Показано, что при синхронном взаимодействии двух мод накачки и моды второй гармоники ограниченность светового пучка накачки может приводить к появ-

лению центрального максимума в индикатрисе нелинейного сигнала, наблюдаемому в эксперименте.

Список публикаций по теме диссертации

- [1] *Maydykovskiy A., Novikov V., Svyakhovskiy S., Murzina T.* Optical effects accompanying the dynamical Bragg Diffraction in linear 1D photonic crystals based on porous silicon // *Crystals*. — 2014. — Vol. 4, no. 4. — Pp. 427–438.
- [2] *Novikov V. B., Mantsyzov B. I., Murzina T. V.* Spectral features of the Borrmann effect in 1D photonic crystals in the Laue geometry // *Proc. SPIE*. — 2017. — Vol. 10227. — Pp. 102270H–102270H–11.
- [3] *Novikov V. B., Maydykovskiy A. I., Mantsyzov B. I., Murzina T. V.* Laue diffraction in one-dimensional photonic crystals: The way for phase-matched second-harmonic generation // *Phys. Rev. B*. — 2016. — Jun. — Vol. 93. — P. 235420.
- [4] *Novikov V. B., Murzina T. V.* Borrmann effect in photonic crystals // *Opt. Lett.* — 2017. — Apr. — Vol. 42, no. 7. — Pp. 1389–1392.
- [5] *Novikov V. B., Svyakhovskiy S. E., Maydykovskiy A. I., Murzina T. V., Mantsyzov B. I.* Optical pendulum effect in one-dimensional diffraction-thick porous silicon based photonic crystals // *Journal of Applied Physics*. — 2015. — Vol. 118, no. 19. — P. 193101.
- [6] *Svyakhovskiy S. E., Maydykovskiy A. I., Novikov V. B., Kompanets V. O., Skorynin A. A., Bushuev V. A., Chekalin S. V., Murzina T. V., Mantsyzov B. I.* Dynamical Bragg diffraction in the Laue geometry in 1D porous silicon-based photonic crystals // *Journal of Russian Laser Research*. — 2015. — Vol. 36, no. 6. — Pp. 588–601.
- [7] *Скорынин А. А., Свяховский С. Е., Новиков В. Б., Бушувев В. А., Майдыковский А. И., Мурзина Т. В., Манцызов Б. И.* Маятниковый эффект с большим числом периодов в фотонных кристаллах из пористого оксида кремния // *Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та*. — 2013. — no. 5. — P. 24.
- [8] *Novikov V. B., Maydykovskiy A. I., Mantsyzov B. I., Murzina T. V.* Experimental observation of the Borrmann effect in one-dimensional photonic crystals in the Laue geometry // *Журнал прикладной спектроскопии*. — 2016. — Vol. 83, no. 6-16. — Pp. 148–149.

Список цитированной литературы

- [1] *Lodahl P., Van Driel A. F., Nikolaev I. S., Irman A. et al.* Controlling the dynamics of spontaneous emission from quantum dots by photonic crystals // *Nature*. — 2004. — Vol. 430, no. 7000. — P. 654.

- [2] *Baba T.* Slow light in photonic crystals // *Nature photonics*. — 2008. — Vol. 2, no. 8. — Pp. 465–473.
- [3] *Meier M., Mekis A., Dodabalapur A., Timko A., Slusher R. E., Joannopoulos J. D., Nalamasu O.* Laser action from two-dimensional distributed feedback in photonic crystals // *Applied Physics Letters*. — 1999. — Vol. 74, no. 1. — Pp. 7–9.
- [4] *Mekis A., Chen J. C., Kurland I., Fan S., Villeneuve P. R., Joannopoulos J. D.* High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides // *Phys. Rev. Lett.* — 1996. — Oct. — Vol. 77. — Pp. 3787–3790.
- [5] *Corcoran B., Monat C., Grillet C., Moss D. J., Eggleton B. J., White T., O’Faolain L., Krauss T. F.* Green light emission in silicon through slow-light enhanced third-harmonic generation in photonic-crystal waveguides // *Nature photonics*. — 2009. — Vol. 3, no. 4. — Pp. 206–210.
- [6] *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.
- [7] *Kato N., Lang A. R.* A study of pendellösung fringes in x-ray diffraction // *Acta Crystallographica*. — 1959. — Vol. 12, no. 10. — Pp. 787–794.
- [8] *Campbell H. N.* X-ray absorption in a crystal set at the Bragg angle // *Journal of Applied Physics*. — 1951. — Vol. 22, no. 9. — Pp. 1139–1142.
- [9] *Dardano P., Mocella V., Moretti L., Rendina I.* Negative refraction devices based on self-collimating photonic crystals. — 2007.
- [10] *Mikhailov I., Baturin A., Kondratenko V., Kopilets I., Mikhailov A.* Prospects for application of x-ray anomalous transmission effect to monochromatization of broadband spectrum // *Journal of X-ray science and technology*. — 2017. — Vol. 25, no. 1. — Pp. 25–32.
- [11] *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 // *Phys. Rev. A*. — 2012. — Jul. — Vol. 86. — P. 013843.
- [12] *Майер А., Сухоруков А.* Синхронное нелинейное взаимодействие волн при брэгговской дифракции в средах с периодической структурой // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 1979. — Vol. 77, no. 4. — P. 1282.
- [13] *Batterman B. W., Cole H.* Dynamical diffraction of x rays by perfect crystals // *Rev. Mod. Phys.* — 1964. — Jul. — Vol. 36. — Pp. 681–717.
- [14] *Borrmann G.* Über extinktionsdiagramme der röntgenstrahlen von quarz // *Phys. Z.* — 1941. — Vol. 42. — Pp. 157–162.

- [15] *Saccocio E. J.* Application of the dynamical theory of x-ray diffraction to holography // *Journal of Applied Physics*. — 1967. — Vol. 38, no. 10. — Pp. 3994–3998.
- [16] *Carretero L., Madrigal R. F., Fimia A., Blaya S., Beléndez A.* Study of angular responses of mixed amplitude–phase holographic gratings: shifted Borrmann effect // *Opt. Lett.* — 2001. — Jun. — Vol. 26, no. 11. — Pp. 786–788.
- [17] *Savo S., Gennaro E. D., Miletto C., Andreone A., Dardano P., Moretti L., Mocella V.* Pendellösung effect in photonic crystals // *Opt. Express*. — 2008. — Jun. — Vol. 16, no. 12. — Pp. 9097–9105.
- [18] *Calvo M. L., Cheben P., Martínez-Matos O., del Monte F., Rodrigo J. A.* Experimental detection of the optical pendellösung effect // *Phys. Rev. Lett.* — 2006. — Aug. — Vol. 97. — P. 084801.
- [19] *Calvo M. L., Cheben P.* Photopolymerizable sol–gel nanocomposites for holographic recording // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. — 2009. — Vol. 11, no. 2. — P. 024009.
- [20] *Mocella V., Dardano P., Moretti L., Rendina I.* A polarizing beam splitter using negative refraction of photonic crystals // *Opt. Express*. — 2005. — Sep. — Vol. 13, no. 19. — Pp. 7699–7707.
- [21] *Rajput M., Sinha R.* Broad angle and frequency tunable photonic crystal polarization beam splitter based on negative refraction: Transition from right-handed to left-handed medium // *Optica Applicata*. — 2011. — Vol. 41, no. 1. — Pp. 29–40.
- [22] *Lehmann V.* Electrochemistry of Silicon: Instrumentation, Science, Materials and Applications. — Wiley-VCH, 2002.
- [23] *Ярув А., Юх П.* Оптические волны в кристаллах. — 1987.
- [24] *Moharam M. G., Gaylord T. K.* Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction // *J. Opt. Soc. Am.* — 1981. — Jul. — Vol. 71, no. 7. — Pp. 811–818.
- [25] *Nakagawa W., Tyan R.-C., Fainman Y.* Analysis of enhanced second-harmonic generation in periodic nanostructures using modified rigorous coupled-wave analysis in the undepleted-pump approximation // *J. Opt. Soc. Am. A*. — 2002. — Sep. — Vol. 19, no. 9. — Pp. 1919–1928.
- [26] *Sakoda K.* Optical properties of photonic crystals. — Springer Science & Business Media, 2004. — Vol. 80.