

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Скорынин Александр Андреевич

ДИНАМИКА ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ БРЭГГОВСКОЙ
ДИФРАКЦИИ В ГЕОМЕТРИИ ЛАУЭ В ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ
ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

Специальность 01.04.05 – Оптика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре общей физики физического факультета
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Манцызов Борис Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Маймистов Андрей Иванович,
НИЯУ МИФИ

кандидат физико-математических наук,
Карташов Ярослав Вячеславович,
старший научный сотрудник, ИСАН

Ведущая организация: НИЦ «Курчатовский институт»

Защита состоится 27 июня 2013 г. в 11-30 часов на заседании
диссертационного совета Д 501.001.67 при Московском государственном
университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-2, Москва,
Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, дом 1, строение 2, физический
факультет, физическая аудитория имени Р.В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан « » мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.67,
к. ф.-м. н., доцент

Королев А.Ф.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В настоящее время все большее значение в науке и технике приобретает использование коротких импульсов лазерного оптического излучения. Такие сигналы используются для передачи и обработки информации, для исследования и модификации материалов. Поиск новых методов генерации и управления параметрами коротких лазерных импульсов является актуальной задачей. Одним из наиболее перспективных направлений её решения является исследование оптических явлений, возникающих при брэгговской дифракции излучения в периодических структурах.

С момента появления искусственных одно-, двух- и трехмерных структур с периодом модуляции оптических свойств порядка длины волны видимого света – фотонных кристаллов (ФК), наиболее широко экспериментально и теоретически были исследованы задачи, связанные с брэгговской дифракцией на отражение (геометрия Брэгга). Отличительной чертой этой геометрии дифракции в ФК является наличие особой спектральной области – фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ), в которой падающее излучение эффективно отражается, проникая в структуру на относительно малую глубину. За счет решеточной дисперсии, вызванной дифракцией на периодической структуре, внутри ФЗЗ и в её окрестностях, наблюдается ряд линейных и нелинейных эффектов, которые были хорошо изучены и в настоящее время нашли практическое применение.

Кроме геометрии Брэгга, при описании распространения излучения в периодических структурах выделяют схему на прохождение (геометрия Лауэ). В этой геометрии отсутствует ФЗЗ – падающее излучение даже в спектральной области наиболее сильной решеточной дисперсии распространяется сквозь структуру. Динамическая дифракция в этой геометрии приводит к возникновению маятникового эффекта, заключающегося в периодической перекачке энергии проходящих и дифрагированных волн с расстоянием. По сравнению с геометрией Брэгга, теоретическим и экспериментальным исследованиям брэгговской дифракции оптического излучения в ФК в геометрии Лауэ уделялось значительно меньше внимания. Преимущественно рассматривались структуры с толщиной не более нескольких периодов маятникового эффекта: тонкие структуры с большой величиной модуляции показателя преломления и протяженные структуры с малой величиной

модуляции. Это может быть связано с технологической сложностью изготовления ФК, обладающих высоким контрастом показателя преломления и большими пространственными размерами, а также ограниченностью существующих подходов к описанию распространения оптического излучения в таких структурах.

Динамика излучения при линейной дифракции в геометрии Лауэ рассматривалась в ФК с малой величиной модуляции показателя преломления, где были обнаружены маятниковый эффект [1], компрессия чирпированного импульса [2] и модуляция его профиля [3]. В тонких ФК с большой величиной модуляции была исследована локализация поля излучения, показаны наличие маятникового эффекта и возможность управления направлением распространения импульсов [4, 5]. В работе [6] был теоретически предсказан эффект дифракционного деления пространственно неограниченного импульса при дифракции в геометрии Лауэ в нелинейном ФК, в виде брэгговской решетки из тонких слоев резонансных примесей. Наличие этого эффекта дифракционного деления импульса (ДДИ) для случая линейного ФК было предсказано в работе [7], в которой была предложена динамическая теория дифракции имеющая ряд ограничений, в частности, она не позволяла определить возможность экспериментального наблюдения эффекта и ограничивалась рассмотрением только s-поляризованного падающего излучения.

В настоящее время, в связи с появлением эффективных методов изготовления протяженных ФК высокого оптического качества с достаточно большой величиной контраста показателя преломления ($\Delta n / n \sim 0.1$), возрастает интерес к возможности обобщения динамической теории дифракции на случай пространственно ограниченных импульсов и пучков оптического излучения, что позволит описать распространение излучения в реальных образцах ФК. Важной задачей становится исследование динамики лазерного излучения при эффекте ДДИ в ФК с учетом поляризационной чувствительности, а также пространственной локализации поля и компрессии импульсов. Интерес представляет рассмотрение особенностей ДДИ при динамической дифракции в геометрии Лауэ в ФК с нелинейностью, в том числе кэрровского типа, а также возможность образования солитонов.

Таким образом, актуальность диссертационной работы обусловлена широким кругом фундаментальных и прикладных задач, связанных с проблемами управления динамикой и параметрами оптических импульсов.

Решение этих задач является важным шагом для создания на основе ФК компактных эффективных устройств, предназначенных для использования в оптических системах связи и лазерной технике.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является исследование динамики оптических пространственно ограниченных импульсов и пучков при брэгговской дифракции в геометрии Лауэ в линейных и нелинейных фотонных кристаллах с большой величиной контраста показателя преломления (~ 0.1).

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие задачи.

1. В наиболее общем виде получить теоретическое описание динамической брэгговской дифракции пространственно ограниченных волновых пакетов в геометрии Лауэ в линейных одномерных ФК с большой модуляцией показателя преломления. В рамках этой теории исследовать динамику поля при ДДИ, получить зависимость величины эффекта от параметров структуры и падающего излучения.
2. Исследовать компрессию частотно-модулированных импульсов и поперечное сжатие волновых пакетов с пространственной модуляцией фазы, при динамической брэгговской дифракции в ФК.
3. Исследовать динамику поля в ФК при большом числе периодов маятникового эффекта и получить оценку возможности использования таких структур для реализации полностью оптического переключения.
4. Исследовать пространственное распределение поля при эффекте ДДИ для ограниченного импульса и пространственное деление пучка в ФК с большой величиной модуляции. Рассмотреть возможность наличия оптического эффекта Бормана в таких структурах.
5. Рассмотреть в рамках двухволнового подхода динамику импульсов в геометрии Лауэ в ФК с кубической нелинейностью. Исследовать численными методами солитоноподобные режимы распространения импульсов, возникающих при ДДИ в таких структурах.

Научная новизна работы

Научная новизна результатов работы заключается в следующем.

1. Впервые получено описание распространения ограниченных импульсов и пучков при динамической брэгговской дифракции в геометрии Лауэ в

линейных одномерных ФК с относительно большим контрастом показателя преломления.

2. Теоретически предсказаны новые эффекты при динамической дифракции в ФК в геометрии Лауэ: дифракционное деление пространственно ограниченного импульса, селективная компрессия и селективная фокусировка фазомодулированных импульсов.
3. Впервые проведено исследование поляризационной чувствительности эффекта ДДИ в ФК и показано, что в результате деления плоскополяризованного импульса внутри структуры образуются от двух до четырех импульсов.
4. Впервые показана возможность эффективного переключения направления распространения излучения оптического импульса при наличии большого числа периодов маятникового эффекта в ФК с большим контрастом показателя преломления.
5. Предсказано возникновение Лауэ-солитона при динамической дифракции в геометрии Лауэ в кубически нелинейном ФК.

Практическая значимость работы

Исследованные в работе эффекты дифракционного деления импульсов, селективной компрессии и фокусировки лазерных импульсов, а также маятниковый эффект, являются перспективными в плане практического применения в таких областях как нанофотоника, телекоммуникации, информационные системы, лазерная техника. На их основе могут быть разработаны компактные устройства для деления лазерных импульсов с управляемой задержкой, компрессоры, брэгговские линзы и оптические маршрутизаторы.

Положения, выносимые на защиту

1. Теория динамической брэгговской дифракции лазерного излучения в геометрии Лауэ в линейных одномерных ФК с относительно большим контрастом модуляции показателя преломления (~ 0.1).
2. Эффект дифракционного деления пространственно ограниченного оптического импульса в ФК и его поляризационная чувствительность.
3. Селективная компрессия чирпированных импульсов в ФК, заключающаяся в сжатии либо бормановского, либо антибормановского импульсов, и селективная фотонно-кристаллическая линза.

4. Поляризация и высокая спектральная чувствительность направления распространения излучения при дифракции в ФК с большим числом периодов маятникового эффекта.
5. Наличие эффекта Бормана для оптических импульсов и устойчивость локализации поля при дифракции коротких пространственно ограниченных импульсов в ФК.
6. Формирование Лауэ солитона модифицированного нелинейного уравнения Шредингера при ДДИ в геометрии Лауэ в ФК с кубически нелинейной решеткой.

Апробация результатов

Основные результаты работы были доложены на 22 научных конференциях, школах и семинарах: Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (С.Петербург, 2008, 2010, 2012); Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» (Звенигород, 2009, 2010, 2011, 2012); XII Московская международная коммуникационная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь и наука» (Москва, 2009); Конференция «Ломоносов-2010», секция «физика» (Москва, 2010); Международная конференция ICONO/LAT (Kazan, 2010); OSA Optics & Photonics Congress (Karlsruhe, Germany, 2010); Научно-техническая конференция «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА» (Москва, МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2011); III международная молодежная научная школы-семинар «Современные методы анализа дифракционных данных дифракционные методы для нанотехнологии» (Великий Новгород, 2011); VII международная конференция молодых ученых и специалистов «ОПТИКА – 2011» (Санкт-Петербург, 2011); Int. Workshop Nonlinear Photonics: Theory, Materials and Applications (St.Petersburg, 2011); 2nd Chinese-Russia Summer school on laser physics (Beijing, 2012); 20th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology” (Nizhny Novgorod, 2012), Foundations & Advances in Nonlinear Science (16-th International Conference-School) and Advances in Nonlinear Photonics (International Symposium) (Minsk, Belarus, 2012); 50 years of Nonlinear Optics Symposium (Barcelona, 2012); 15th International Conference “Laser Optics 2012” (Saint-Petersburg, 2012); Международная конференция IONS-11 (Paris, Ecole Polytechnique, 2012); Frontiers in Optics Conference, OSA (2012).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 31 печатной работе. Из них 5 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК [А1-А5], и 26 работ в сборниках трудов конференций [А6-А31]. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем составляет 148 страниц. Диссертация включает 49 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 132 наименования.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи, дана общая характеристика работы. Приведены положения, выносимые на защиту, наиболее важные результаты исследований, описаны их новизна и практическая значимости.

Глава 1 содержит обзор литературы, отражающей современное состояние проблем в области исследования динамики электромагнитного излучения в периодических структурах. Представлены описание динамической теории дифракции рентгеновского излучения и её основные результаты. Изложены основные теоретические и экспериментальные результаты, полученные при рассмотрении динамической дифракции в геометрии Брэгга в линейных и нелинейных ФК. Особое внимание уделено дифракции в геометрии Лауэ в тонких ФК и ФК с малой величиной модуляции показателя преломления. Основной акцент сделан на изменение параметров импульсов при распространении: эволюцию профиля, пространственную и временную компрессию, изменение направления распространения и др. Рассмотрены имеющиеся теоретические результаты по описанию эффекта ДДИ в линейных и нелинейных ФК.

В главе 2 развита теория динамической брэгговской дифракции пространственно ограниченных оптических импульсов в геометрии Лауэ в линейных толстых, по сравнению с периодом маятникового эффекта, одномерных ФК с большой величиной контраста показателя преломления.

В первом параграфе с использованием спектрального подхода в двухволновом приближении решена граничная задача для волнового уравнения

$$\Delta \mathcal{E} + \nabla \left(\mathcal{E} \cdot \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \right) + k^2 \varepsilon \mathcal{E} = 0, \quad (1)$$

где \mathcal{E} – вектор электрического поля, ε – периодическая функция диэлектрической проницаемости ФК, $k = \omega / c$ – модуль волнового вектора, ω – частота излучения, c – скорость света в вакууме. Из (1) получена система динамических уравнений для амплитуд проходящих и дифрагированных волн, описывающая дифракцию произвольно плоскополяризованного излучения в ФК.

Для случая s-поляризации с учетом граничных условий для каждой спектральной компоненты импульса получено решение системы, описывающее две пары возникающих внутри структуры проходящих и дифрагированных волн с волновыми векторами

$$\mathbf{q}_{gj} = \mathbf{e}_x (q_{0x} - g) + \mathbf{e}_z q_{zj}, \quad g = 0, h, \quad j = 1, 2,$$

где h – волновой вектор обратной решетки ФК, q_{0x} – проекция волнового вектора на ось x , направленную вдоль входной поверхности и перпендикулярно слоям ФК, q_{zj} – проекции волновых векторов на ось z , направленную вдоль плоскости слоев структуры. Проекция q_{0x} определяется из граничных условий, а q_{zj} из дисперсионного уравнения

$$q_{zj}^{(s)2} (q_{0x}, \omega) = k^2 \chi_0 - q_{0x}^2 + h \alpha_0 \mp \sqrt{h^2 \alpha_0^2 + C^{(s)2} \chi^2 k^4}, \quad (2)$$

где $\alpha_0 = q_{0x} - h / 2$ – величина отстройки от условия Брэгга, $\chi^2 = \chi_h \chi_{-h}$, χ_0 , χ_h и χ_{-h} – фурье-амплитуды пространственных гармоник функции диэлектрической проницаемости структуры, $C^{(s)} = 1$ – поляризационный фактор.

Каждое решение дисперсионного уравнения (2) описывает волновые вектора дифрагированной и проходящей волн, сумма полей которых для каждого j внутри ФК формирует стоячую в направлении x волну – собственную моду структуры. Моду с индексом «1», имеющую пучности в слоях ФК с меньшим показателем преломления, называют бормановской, а с индексом «2», имеющую пучности в слоях с большим показателем, – антибормановской.

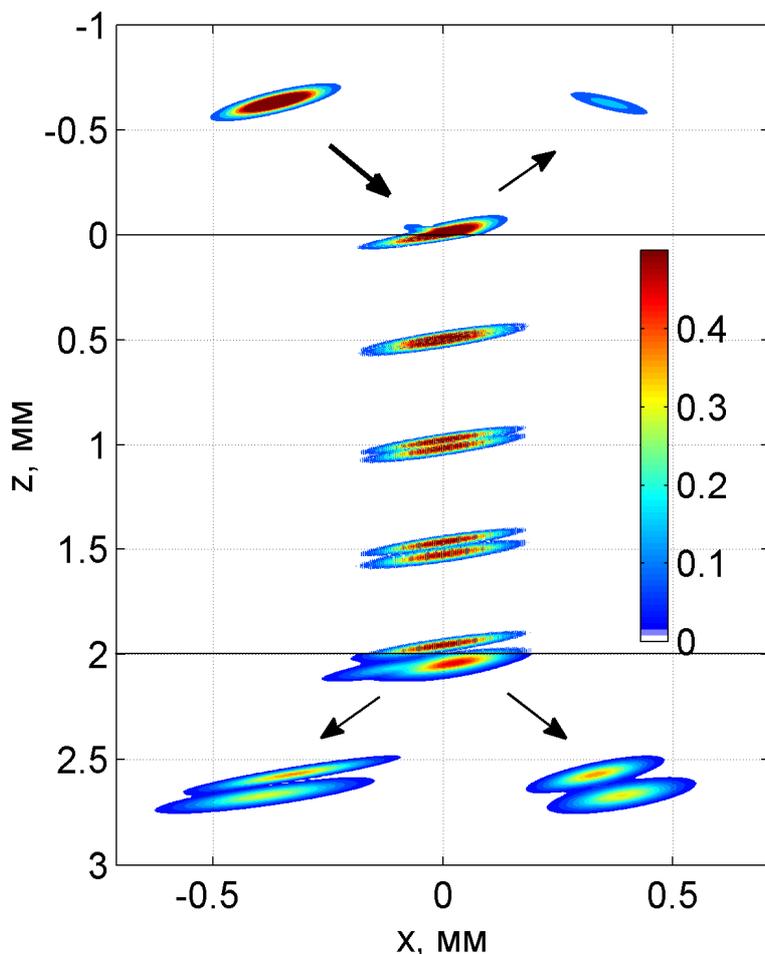


Рисунок 1 –
 Пространственное
 распределение модуля
 суммарного электрического
 поля при дифракции
 пространственно
 ограниченного импульса в
 ФК в различные моменты
 времени, рассчитанное по
 формулам (3). Линиями
 показаны границы
 структуры. Показатели
 преломления ФК $n_1 = 1.4$ и
 $n_2 = 1.3$, его период
 $d = 800$ нм, длина волны
 излучения $\lambda = 800$ нм, угол
 падения совпадает с углом
 Брэгга $\theta_B = 30^\circ$

Получены выражения, описывающие пространственно-временное распределение проходящего и дифрагированного полей волновых пакетов, образованных этими волнами:

$$\mathcal{E}_g^{(S)}(x, z, t) = \mathbf{e}_y \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B_g^{(S)}(q_{0x}, \omega, z) E_{in}(q_{0x}, \omega) \exp(iq_{0x}x - i\omega t) dq_{0x} d\omega, \quad g = 0, h, \quad (3)$$

где $B_g^{(S)}(q_{0x}, \omega, z) = \sum_{j=1,2} E_{gj}^{(S)} \exp(iq_{zj}^{(S)} z)$, $E_{gj}^{(S)}$ – спектральные амплитуды, определяемые при решении граничной задачи.

Во втором параграфе с использованием (3) проведено исследование динамики поля падающего излучения и продемонстрировано наличие эффекта ДДИ для пространственно ограниченного импульса (рис. 1). Показано, что в результате дифракции каждый падающий импульс образует внутри ФК два импульса – бормановский и антибормановский – с различными групповыми скоростями. На выходе из структуры спектральные компоненты проходящего и дифрагированного излучения перестают быть связаны динамической дифракцией, поэтому волны разделяются, что приводит к формированию

последовательности из двух импульсов в проходящем и дифрагированном направлениях.

В третьем параграфе получены выражения, описывающие количественные характеристики эффекта ДДИ. Показано, что временной интервал между импульсами на выходе t_{12} , зависит от параметров излучения и структуры. Для случая падения импульса под углом Брэгга получено простое аналитическое выражение

$$t_{12}^{(s)} = L\chi(\chi_0 - 2\sin^2 \theta_B) / c\gamma_0^3, \quad (4)$$

где $\gamma_0 = (\chi_0 - \sin^2 \theta_B)^{1/2}$, θ_B – угол Брэгга, L – толщина ФК.

Ограничения на пространственные размеры импульса и другие параметры падающего излучения, при которых дифракция описывается рассматриваемой теорией и наблюдается ДДИ, были получены из анализа дисперсионного уравнения и коэффициентов, входящих в (3). Так толщина структуры, при которой наблюдается ДДИ, должна быть не менее

$$L_{DIPS}^{(s)} = 2\tau_0 c \gamma_0^3 / \chi(\chi_0 - 2\sin^2 \theta_B).$$

Полученные в главе 2 результаты были опубликованы в работах [A1-A5].

Глава 3 содержит описание решений задач динамики лазерных импульсов при ДДИ в ФК, связанных с поляризационной чувствительностью эффекта и компрессией фазомодулированных волновых пакетов. Проведено сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными при наблюдении ДДИ в реальных ФК.

В первом параграфе получены решения системы динамических уравнений для случая р-поляризованного падающего излучения. В этом случае волновые векторы индуцируемых в структуре волн описываются дисперсионным уравнением, аналогичным (2), в котором величина поляризационного фактора принимает иной вид:

$$C^{(P)} = \left[1 - h^2 / \chi_0 k^2 + h^2 (h - q_{0x}) q_{0x} / \chi_0^2 k^4 \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Дисперсионные зависимости для s- и р-поляризации показывают, что в обоих случаях при точном выполнении условия Брэгга групповые скорости импульсов, определяемые нормальными к дисперсионным кривым, направлены вдоль плоскостей слоев ФК (рис. 2а), а их модули отличаются (рис. 2б). При отклонении от условия Брэгга групповые скорости будут направлены под углом

θ_j , причем бормановский и антибормановский импульсы будут распространяться в разные стороны от оси x . Влияние поляризации излучения проявляется в количественной величине эффектов. Так, в случае р-поляризации разность групповых скоростей импульсов и значений углов θ_j больше, чем для s-поляризации (рис. 2). При условии Брэгга временной интервал между импульсами на выходе при р-поляризации составляет

$$t_{12}^{(P)} = L\chi\chi_0 / c\gamma_0^3,$$

что больше, чем для s-поляризации (4), и $L_{DIPS}^{(S)} > L_{DIPS}^{(P)}$. Отсюда следует, что в общем случае дифракционное деление плоскополяризованного импульса сопровождается образованием четырех импульсов внутри структуры.

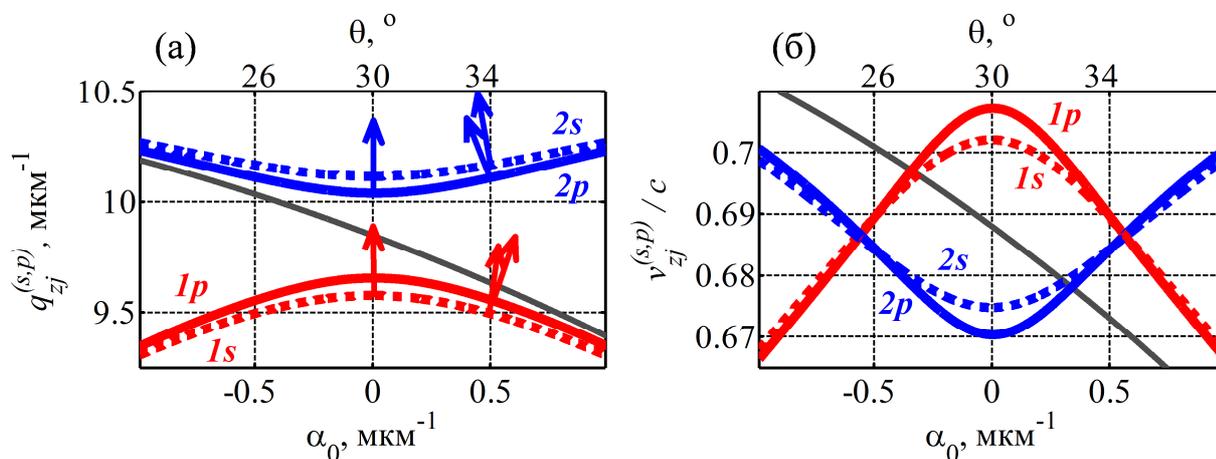


Рисунок 2 – Дисперсионные кривые $q_{zj}^{(s,P)}(\alpha_0)$ бормановской (1) и антибормановской (2) мод для s- (пунктир) и р-поляризации (сплошная линия) падающего на ФК излучения (а). Стрелками показаны направления нормалей. Групповые скорости импульсов, образованных этими модами (б). Аналогичные зависимости для однородной среды со средним показателем преломления ФК показаны сплошной серой линией. Величина отстройки α_0 соответствует углам падения θ , приведенным сверху на графиках. Параметры излучения и структуры как на рис. 1

Во втором параграфе главы показано, что сильная решеточная дисперсия в ФК, зависящая от моды, приводит к существенному изменению фазовой модуляции и формы волновых пакетов при распространении внутри структуры. Так, при дифракционном делении chirпированного импульса наблюдается селективная компрессия медленного антибормановского импульса и расплывание бормановского (рис. 3а), при этом смена знака chirпа падающего

импульса на противоположный сопровождалась сменой импульса, испытывающего компрессию (рис. 3б).

При исследовании распространения импульсов с пространственной модуляцией фазы, т.е. сфокусированных и дефокусированных, показано, что ФК выступает в качестве селективной фотонно-кристаллической брэгговской линзы, сжимая в поперечном направлении волновой пакет, образованный либо антибормановскими, либо бормановскими модами (рис. 3в).

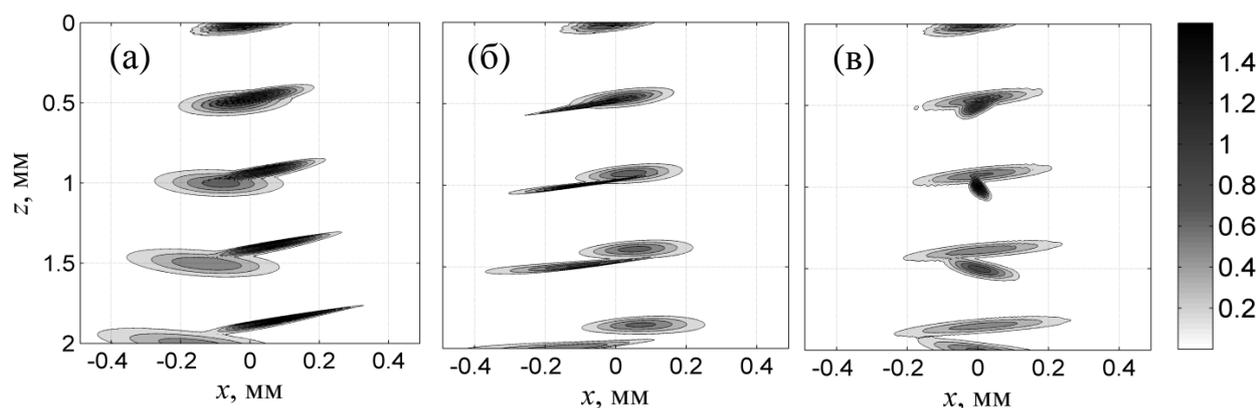


Рисунок 3 – Пространственное распределение модуля поля при дробном делении фазомодулированных импульсов: импульс с положительным чирпом (а), импульс с отрицательным чирпом (б), сфокусированный импульс (в)

В приближении пространственно-частотной дисперсии второго порядка получены аналитические выражения, описывающие селективное воздействие структуры на падающее излучение. Определены зависимости глубины и степени сжатия импульсов.

В третьем параграфе представлены результаты сравнения развитой в работе теории ДДИ и экспериментальных наблюдений этого эффекта в реальных ФК. Изготовление образцов ФК на основе пористого оксида кремния и измерения были проведены в группе д.ф.-м.н. Т.В. Мурзиной на кафедре квантовой электроники физического ф-та МГУ в сотрудничестве с группой проф. С.В. Чекалина, ИСАН.

Измеряемые автокорреляционные функции (АКФ) интенсивности сигналов (I_{AC}) на выходе из ФК в проходящем и дифрагированном направлениях для случаев s - и p -поляризаций (рис. 4а и 4б) были сопоставлены с теоретическими зависимостями, полученными на основе вычисления пространственно-временного распределения интенсивности поля (3) (рис. 4в и 4г). В пределах погрешностей эксперимента было получено полное согласие

между длительностями интервалов деления импульсов $t_{12}^{(s,p)}$, длительностями самих импульсов и их относительными амплитудами.

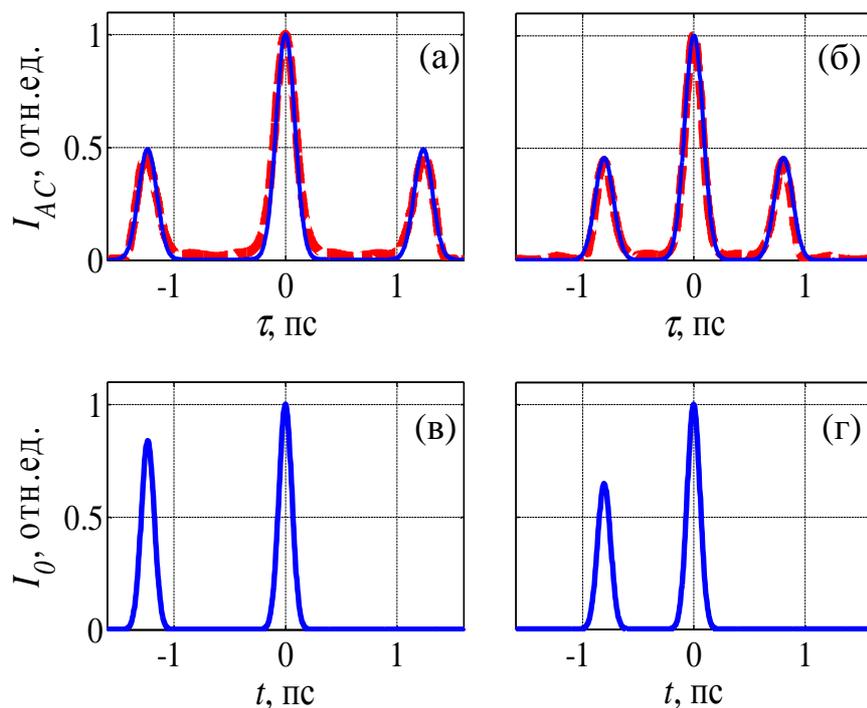


Рисунок 4 –
 Экспериментальные (пунктир) и теоретические (сплошные линии) АКФ I_{AC} импульсов на выходе из ФК в проходящем направлении для s- (а) и р-поляризаций (б) для проходящего излучения. Интенсивности импульсов (в, г), полученные по формулам (3)

Полученные в главе 3 результаты были опубликованы в работах [А3, А4, А5].

В главе 4 исследованы эффекты, связанные с пространственной динамикой поля при дифракции в геометрии Лауэ в линейном ФК, и рассмотрено распространение импульсов при наличии в ФК нелинейности.

В первом параграфе исследован маятниковый эффект в ФК (рис. 5). Показано, что глубина экстинкции Λ , равная половине периода маятникового эффекта, в рассматриваемых ФК с большой величиной модуляции показателя преломления по порядку величины сопоставима с длиной волны излучения. Вследствие этого достаточно даже малого изменения величины Λ , за счет изменения параметров излучения или структуры, чтобы число Λ внутри структуры изменилось на единицу, а на выходе максимум проходящего излучения сменился максимумом дифрагированного или наоборот.

Наличие маятникового эффекта и его высокая спектральная чувствительность, при которой переключение направления происходит уже при изменении длины волны на 3-5 нм (рис. 6), были экспериментально подтверждены на примере образцов, рассмотренных в главе 3. Как следует из полученных оценок, для переключения достаточно изменения разности

показателей преломления слоев на величину $\delta n = n_1 - n_2 \sim 10^{-4}$, что может быть достигнуто за счет фоторефрактивного эффекта или самовоздействия в нелинейном ФК.

Таким образом, на основе ФК может быть построен оптический частотный маршрутизатор, а также полностью оптический переключатель направления распространения излучения.

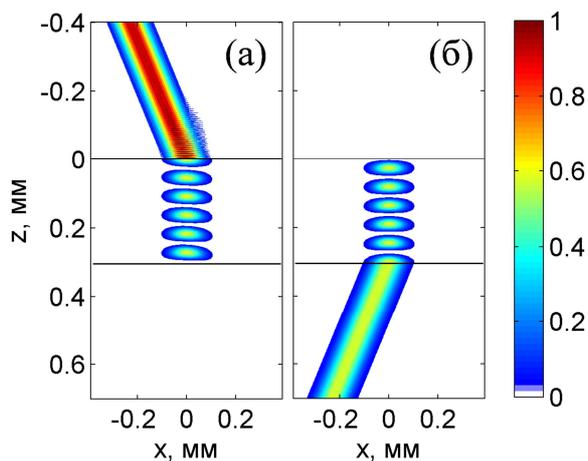


Рисунок 5 – Пространственное распределение интенсивности проходящего (а) и дифрагированного (б) полей при маятниковом эффекте в ФК с $\delta n = 0.02$

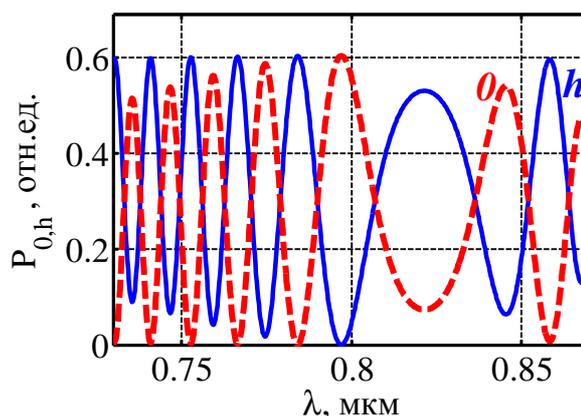


Рисунок 6 – Мощности проходящего (O) и дифрагированного (h) излучения на выходе из ФК при маятниковом эффекте в зависимости от длины волны. Параметры как на рис. 1

Во втором параграфе детально рассмотрен эффект пространственной локализации поля бормановского и антибормановского волновых пакетов в различных слоях ФК. Показано, что этот эффект наблюдается даже для импульсов, пространственно-частотный спектр которых сопоставим с размером брэгговской зоны дифракции (рис. 7), и пропадает только при существенном отклонении угла падения от брэгговского.

При наличии поглощения в одном из двух типов слоев ФК импульс, преимущественно локализованный в этих слоях, поглощается, поэтому в результате ДДИ удвоения числа импульсов не происходит. При этом вблизи условия Брэгга наблюдается максимум интегрального пропускания структуры, что является оптической аналогией классического эффекта Бормана, известного из рентгеновской оптики.

Также в этом параграфе рассмотрен эффект пространственного деления бормановского и антибормановского волновых пакетов, связанный с различием направлений векторов групповых скоростей при отклонении от условия Брэгга.

Получены количественные оценки и сформулированы условия, при которых этот эффект может быть наблюдаем.

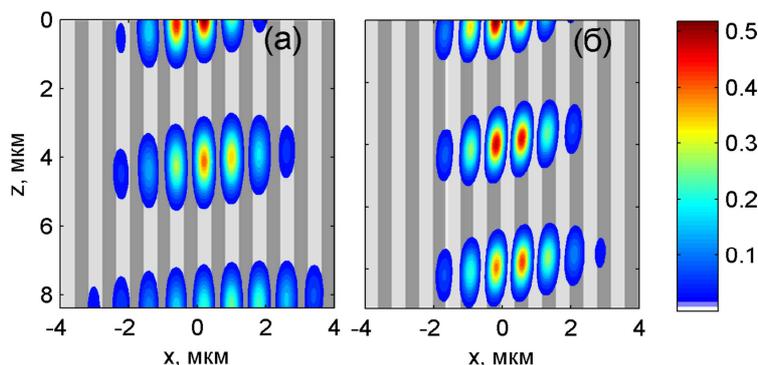


Рисунок 7 – Пространственная локализация полей бормановского (а) и антибормановского (б) импульсов относительно слоев ФК

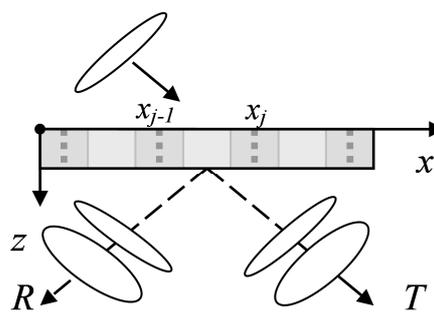


Рисунок 8 – Геометрия Лауэ ДДИ в нелинейном ФК с тонкими слоями кубической среды

В третьем параграфе рассмотрена динамика импульсов при брэгговской дифракции в геометрии Лауэ в ФК с кубической нелинейностью. Использована модель нелинейного ФК в виде решетки δ -функций, в которой нелинейная среда сосредоточена в тонких слоях, размещенных в центрах слоев линейной матрицы ФК с координатами x_j (рис. 8). В рамках двухволнового приближения задача дифракции в такой структуре сводится к двум динамическим дифференциальным уравнениям второго порядка. Одно из них описывает линейно распространяющийся бормановский импульс, а другое – нелинейный антибормановский импульс. Последнее может быть записано в виде модифицированного нелинейного уравнения Шредингера (МНУШ):

$$i \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial \eta^2} + A \frac{\partial^2 E}{\partial \eta \partial \xi} + BE + \alpha E |E|^2 = 0, \quad (6)$$

где E – огибающая амплитуд, α , A и B – коэффициенты, определяемые параметрами излучения и структуры, ξ и η – продольная и поперечная координаты.

С использованием разностной аппроксимации дифференциальных операторов и итерационной процедуры для линеаризации уравнения были найдены численные решения МНУШ в виде импульсов, сохраняющих свои характеристики при распространении на большие расстояния (рис. 9а) и при взаимодействии с другими импульсами (рис. 9б), тем самым проявляющих солитонные свойства. Полученные численные решения хорошо согласуются с

точными решениями (6). Примеры динамики Лауэ-солитонов приведены на рис. 9.

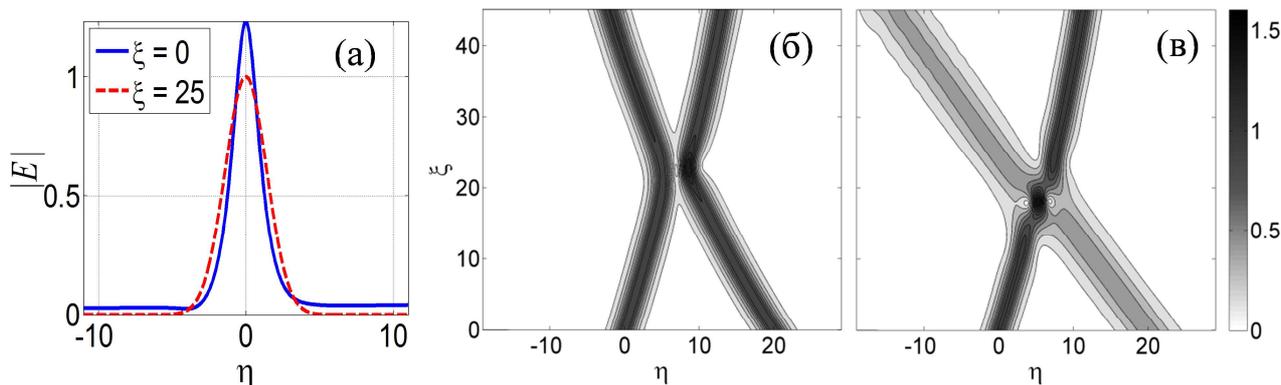


Рисунок 9 – Динамика импульсов в нелинейном ФК: а) формирование Лауэ-солитона из импульса с гауссовой огибающей; б) столкновение двух солитонов с одинаковыми амплитудами и фазами, в) столкновение двух солитонов с различными амплитудами и противоположными начальными фазами (в)

Полученные в главе 4 результаты были опубликованы в работах [A1, A5, A16, A19, A31].

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы, которые сводятся к следующему.

Основные результаты и выводы

1. Развита теория динамической брэгговской дифракции лазерного излучения в геометрии Лауэ в линейных одномерных ФК с относительно большим контрастом показателя преломления (~ 0.1). В рамках спектрального подхода решена граничная задача брэгговской дифракции, получены аналитические выражения для описания пространственно-временной динамики поля при распространении ограниченных импульсов и пучков в полубесконечной и ограниченной структурах.
2. Впервые предсказан эффект дифракционного деления пространственно ограниченного оптического импульса в ФК. Исследована поляризационная чувствительность данного эффекта. Показано, что за счет большой решеточной дисперсии в ФК длина деления, т.е. глубина, на которой происходит деление импульса, и количество выходных импульсов существенно зависят от поляризации излучения. Получены аналитические зависимости скоростей разделенных импульсов и длины деления от параметров структуры и излучения. Теоретическое описание ДДИ

полностью подтверждается экспериментальным наблюдением эффекта в ФК из пористого оксида кремния.

3. Впервые предсказана селективная компрессия chirпированных импульсов в ФК, заключающаяся в сжатии одного из двух импульсов, возникающих при ДДИ, – бормановского или антибормановского. Тип импульса, испытывающего компрессию, определяется знаком chirпа входного сигнала. Также предсказано селективное поперечное сжатие внутри ФК импульсов и пучков, имеющих изначальную пространственную модуляцию фазы. Селективность заключается в сжатии волнового пакета бормановской моды для сфокусированного входного сигнала и антибормановской – для расфокусированного.
4. Исследованы эффекты динамической брэгговской дифракции в геометрии Лауэ в ФК с большим контрастом показателя преломления. Показана возможность полностью оптического переключения в ФК с толщиной, значительно превышающей период маятникового эффекта. Рассчитанные зависимости мощности проходящего и дифрагированного излучения хорошо согласуются с экспериментальными данными. Предсказано: а) подавление ДДИ за счет оптического эффекта Бормана; б) пространственное деление бормановских и антибормановских импульсов и пучков внутри ФК.
5. Рассмотрена динамическая брэгговская дифракция импульсов в геометрии Лауэ в ФК с кубической нелинейностью. В рамках двухволнового приближения получено численное решение задачи, соответствующее формированию двух импульсов, один из которых распространяется в эффективно линейной среде, а второй является солитоноподобным импульсом, или Лауэ-солитоном, и описывается как решение модифицированного нелинейного уравнения Шредингера. Устойчивость Лауэ-солитона при распространении и столкновении была подтверждена численным моделированием.

Список публикаций автора по теме диссертационной работы

Работы в научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций

- A1. Bushuev V.A., Mantsyzov B.I., Skorynin A.A. Diffraction-induced laser pulse splitting in a linear photonic crystal // *Physical Review A*. 2009. Vol. 79, № 5. P. 053811.
- A2. Бушуев В.А., Манцызов Б.И., Скорынин А.А. Дифракционно-индуцированное деление пространственно ограниченных лазерных импульсов в фотонных кристаллах // *Известия РАН, серия физическая*. 2010. Т. 74, № 7. С. 989–992.
- A3. 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 // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2012. Т. 142, № 1(7). С. 64–76.
- A4. Svyakhovskiy S.E., Kompanets V.O., Maydykovskiy A.I., Murzina T.V., Chekalin S.V., Skorynin A.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, № 1. P. 013843.
- A5. 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 laser pulse splitting in one-dimensional photonic crystals // *Journal of the Optical Society of America B*. 2013. Vol. 30, № 5. P. 1261-1269.

Работы в сборниках статей и трудах конференций

- A6. Бушуев В.А., Манцызов Б.И., Скорынин А.А. Расщепление лазерных импульсов при брэгговской дифракции по схеме Лауэ в линейном фотонном кристалле // *Труды V Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики-2008» на CD*. С.Петербург, 2008. Т. 1. С. 46–47.
- A7. Скорынин А.А., Бушуев В.А., Манцызов Б.И. Пространственная локализация света при дифракционном делении лазерных импульсов в линейном фотонном кристалле // *Тезисы докладов XII Московской международной коммуникационной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь и наука»*. МИФИ, 2009. С. 169–170.
- A8. Скорынин А.А., Бушуев В.А., Манцызов Б.И. Брэгговская дифракция оптического импульсов по схеме Лауэ в линейном фотонном кристалле //

Сборник трудов XII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» на CD, ч. 3. Звенигород, 2009. С. 24.

- A9. Скорынин А.А., Бушуев В.А., Манцызов Б.И. Компрессия оптических импульсов при брэгговской дифракции в геометрии Лауэ в линейном фотонном кристалле // Сборник статей «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия». Казань: Изд-во КГУ, 2009. № 13. С. 245-248,
- A10. Bushuev V.A., Mantsyzov B.I., Skorynin A.A. Diffraction-Induced Splitting of Spatially Confined Laser Pulse in Photonic Crystal // OSA Optics & Photonics Congress Technical Digest CD NTuC9. Karlsruhe, Germany, 2010.
- A11. Bushuev V.A., Mantsyzov B.I., Skorynin A.A. Bragg Diffraction-Induced Laser Pulse Splitting in Photonic Crystal // ICONO/LAT 2010 Technical Digest CD IMA7. Kazan, 2010.
- A12. Скорынин А.А., Манцызов Б.И. Брэгговское дифракционное деление лазерных импульсов в фотонных кристаллах с кубической нелинейностью // Сборник трудов Международной конференции и семинаров. Т.1. «Фундаментальные проблемы оптики – 2010». Санкт-Петербург, 2010. С. 124–125.
- A13. Скорынин А.А. Дифракционное деление фазомодулированных оптических импульсов при брэгговской дифракции в геометрии Лауэ // Сборник тезисов «Ломоносов-2010», секция «физика», том 2. МГУ, 2010. С. 36–39.
- A14. Скорынин А.А., Бушуев В.А., Манцызов Б.И. Динамика лазерных импульсов при брэгговской дифракции в геометрии Лауэ в фотонных кристаллах с кубической нелинейностью // Труды школы-семинара «Волны-2010» на CD, ч. 4. Звенигород, 2010. С. 93.
- A15. Свяховский С.Е., Майдыковский А.И., Скорынин А.А., Мурзина Т.В. Дифракция Лауэ в одномерных фотонных кристаллах: маятниковое решение // Труды школы-семинара «Волны-2011» на CD, ч. 5. Звенигород, 2011. С. 29–31.
- A16. Скорынин А.А., Манцызов Б.И. Нелинейная динамика коротких лазерных импульсов при брэгговской дифракции в геометрии Лауэ в нелинейном фотонном кристалле // Труды школы-семинара «Волны-2011» на CD, ч. 9. Звенигород, 2011. Р. 88.
- A17. Skorynin A.A., Bushuev V.A., Mantsyzov B.I. Pulse compression and soliton propagation under diffraction-induced pulse splitting in photonic crystal // “Int. Workshop Nonlinear Photonics: Theory, Materials and Applications” Technical Digest on CD. St.Petersburg, 2011.
- A18. Бушуев В.А., Манцызов Б.И., Скорынин А.А. Управление параметрами лазерных импульсов при их дифракционном делении в линейных и нелинейных фотонных кристаллах // Материалы III международной молодежной научной школы-семинара “Современные методы анализа

дифракционных данных дифракционные методы для нанотехнологии”. Великий Новгород, 2011. С. 42–43.

- A19. Скорынин А.А. Электрооптический полупроводниковый модулятор на фотонном кристалле // Материалы научно-технической конференции “Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА” Москва, МНТОРЭС им. А.С. Попова. 2011. С. 113–114.
- A20. Skorynin A.A. Bragg diffraction-induced pulse splitting in photonic crystal with cubic nonlinearity // Сборник трудов VII международной конференции молодых ученых и специалистов «ОПТИКА – 2011», Сборник трудов семинаров «Терагерцовая оптика и спектроскопия», «Оптические метаматериалы, фотонные кристаллы и наноструктуры», Сборник трудов школы по метаматериалам. Санкт-Петербург, 2011. С. 617–618.
- A21. Svyakhovsky S.E., Maydykovskiy A.I., Novikov V.B., Kompanets V.O., Chekalin S.V., Skorynin A.A. et al. Diffraction-induced laser pulse splitting in photonic crystals: polarization properties, selective compression and self-focusing // Abstr. “50 years of Nonlinear Optics Symposium” (Barcelona, 2012). Barcelona, 2012. P. TP.SE.
- A22. Svyakhovsky S.E., Maydykovskiy A.I., Novikov V.B., Kompanets V.O., Chekalin S.V., Skorynin A.A. et al. Dynamical diffraction of femtosecond laser pulses in 1D photonic crystals // 2nd Chinese-Russia Summer school on laser physics. Beijing, 2012. P. 10.
- A23. Chekalin S.V., Svyakhovskiy S.E., Kompanets V.O., Mailykovskiy A.I., Murzina T.V., Skorynin A.A. et al. Bragg diffraction-induced laser pulse splitting in a linear photonic crystal // Abstr. 20th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”. Nizhny Novgorod, 2012. P. 68–69.
- A24. Svyakhovskiy S.E., Maydykovskiy A.I., Novikov V.B., Kompanets V.O., Skorynin A.A. et al. Bragg Diffraction-Induced Splitting of Femtosecond Laser Pulses in a Photonic Crystal // Frontiers in Optics Conference, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2012), paper FT1A.5. Optical Society of America, 2012.
- A25. Svyakhovskiy S.E., Maydykovskiy A.I., Novikov V.B., Kompanets V.O., Skorynin A.A. et al. Temporal Bragg diffraction-induced laser pulse splitting in a linear photonic crystal // In 15th International Conference “Laser Optics 2012” (Saint-Petersburg, 2012), ThR5-25. Saint-Petersburg, 2012.
- A26. Svyakhovskiy S.E., Maydykovskiy A.I., Skorynin A.A. et al. The Dynamical Diffraction of Femtosecond Laser Pulses in One-Dimensional Photonic Crystals // IONS-11, Ecole Polytechnique. Paris, 2012. P. 35.
- A27. Скорынин А.А. Новиков В.Б., Свяховский С.Е. и др. Влияние поляризации излучения на эффект дифракционного деления импульса в фотонном кристалле из пористого кварца // Сборник трудов Международной конференции

“Фундаментальные Проблемы Оптики – 2012”. Санкт-Петербург, 2012. С. 27–28.

- A28. Svyakhovsky S.E., Maydykovskiy A.I., Novikov V.B. et al. Experimental observation of the diffraction-induced femtosecond pulse splitting in a linear photonic crystal // Foundations & Advances in Nonlinear Science (16-th International Conference-School) and Advances in Nonlinear Photonics (International Symposium) (Minsk, Belarus, 2012). Programme and Book of abstracts. Minsk, Belarus, 2012. P. 49.
- A29. Skorynin A.A., Bushuev V.A., Mantsyzov B.I. The control of pulses parameters under Bragg diffraction in linear and nonlinear photonic crystals // Foundations & Advances in Nonlinear Science (16-th International Conference-School) and Advances in Nonlinear Photonics (International Symposium) (Minsk, Belarus, 2012). Programme and Book of abstracts. Minsk, Belarus, 2012. P. 50.
- A30. Свяховский С.Е., Майдыковский А.И., Новиков В.Б. и др. Экспериментальное обнаружение дифракционно-индуцированного временного деления фемтосекундных лазерных импульсов в одномерном фотонном кристалле // Сборник трудов XIII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» на CD, ч. 1. Звенигород, 2012. С. 20–21.
- A31. Скорынин А.А., Манцызов Б.И., Бушуев В.А. и др. Влияние поляризационного фактора на эффект дифракционного деления импульса в фотонном кристалле // Сборник трудов XIII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» на CD, ч. 1. Звенигород, 2012. P. 20–21.

Список цитируемой литературы

1. Russell P. Bragg resonance of light in optical superlattices // Physical review letters. 1986. Vol. 56. P. 596–599.
2. Аракелян С.М., Геворкян Л.П., Макаров В.А. Компрессия частотно-модулированных импульсов при динамическом рассеянии в геометрии Лауэ // Квантовая электроника. 1989. Vol. 16, № 9. P. 1846–1849.
3. Baryshevsky V.G., Maksimenko S.A. Light pulse dispersion under Laue diffraction from a spatial holographic grating // Optics Communications. 1992. Vol. 94, № 5. P. 379–388.
4. Terhalle B. et al. Dynamic Diffraction and Interband Transitions in Two-Dimensional Photonic Lattices // Physical Review Letters. 2011. Vol. 106, № 8. P. 083902.
5. Savo S. et al. Pendellösung effect in photonic crystals. // Optics Express. 2008. Vol. 16, № 12. P. 9097–9105.
6. Mantsyzov B.I. Laue soliton in a resonantly absorbing photonic crystal // Optics Communications. 2001. Vol. 189, № 4-6. P. 275–280.