

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

---

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

МАНЦЫЗОВ Борис Иванович

ДИНАМИКА НЕЛИНЕЙНЫХ УЕДИНЕННЫХ ВОЛН  
И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
В ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

Специальность 01.04.05 -оптика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

МОСКВА -2006

Работа выполнена на физическом факультете Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор В. А. Беляков

доктор физико-математических наук,  
профессор А. И. Маймистов

доктор физико-математических наук,  
профессор А. С. Чиркин

Ведущая организация: Институт спектроскопии РАН

Защита состоится «18» мая 2006 г. в 16 часов на заседании Диссертационного совета Д 501.001.67 в Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, ГСП-2, Ленинские горы, д.1, стр.2. физический факультет, ауд. им. Р.В.Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, ГСП-2, Ленинские горы, д.1, стр.2.

Автореферат разослан 10 апреля 2006 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 501.001.67  
кандидат физико-математических наук,  
доцент

Королев А.Ф.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена теоретическому исследованию нелинейно-оптических явлений, возникающих при взаимодействии мощного лазерного излучения с резонансной и квадратично-нелинейной периодическими средами в условиях брэгговской дифракции.

**Актуальность темы.** Одной из важнейших задач физики является изучение распространения волн различной физической природы в веществе. Знание закономерностей этих процессов позволяет эффективно управлять генерацией излучения, его параметрами и динамикой распространения. Особую роль здесь играют периодические среды, обладающие пространственной дисперсией. К ним относятся как природные материалы, например, кристаллы, так и искусственно созданные для различных прикладных целей структуры: брэгговские зеркала для селективного отражения волн определенного частотного диапазона, структуры с распределенной обратной связью для полупроводниковых лазеров, кристаллы с регулярной доменной структурой для эффективного параметрического преобразования частоты оптического излучения, фотонные кристаллы и др. Вплоть до начала 80-х годов XX века распространение волн в средах с периодически распределенными неоднородностями традиционно связывалось с существованием селективных частотных запрещенных зон, в пределах которых волны не могут распространяться в среде и испытывают полное отражение на границе периодической структуры. Это справедливо, например, для рентгеновского излучения (область селективного брэгговского отражения), для волн электронов и квазичастиц в кристаллах (запрещенные энергетические зоны), а также для оптических и акустических волн в слоистых средах.

Дальнейшие исследования показали, что запрет на распространение волн в области селективных брэгговских частот имеет место лишь в приближении линейного взаимодействия волн со средой, когда справедливы дисперсионные соотношения, следующие из линейной теории дифракции. Развитие нелинейной теории брэгговской дифракции мощного оптического излучения в средах с кубической, резонансной и квадратичной нелинейностями позволило по-новому

взглянуть на динамику оптических волн в периодических структурах. Оказалось, что возможно нелинейное подавление полного брэгговского отражения интенсивного лазерного излучения на границе структуры, а в линейно запрещенной фотонной зоне могут распространяться нелинейные уединенные волны – брэгговские солитоны. Они обладают рядом уникальных для оптических импульсов свойств: малая скорость распространения вплоть до остановки света, захват возмущенных солитонов структурой и неупругое взаимодействие с ними свободных солитонов, эффективное управление динамикой медленных интенсивных импульсов света с помощью слабых возбуждений структуры, задержанное отражение оптических импульсов нелинейными структурами и др. Причем исследования не ограничиваются случаем брэгговской геометрии дифракции, описана нелинейная динамика оптических импульсов и пучков в случае дифракции по схеме Лауэ, активно изучаются также пространственные дискретные, пространственно-временные и вихревые солитоны в различных периодических структурах.

Дополнительный интерес к этим проблемам был вызван появлением концепции фотонных кристаллов, которая в значительной степени стимулирует развитие технологий получения линейных и нелинейных одно-, двух- и трехмерных периодических структур высокого оптического качества, в том числе оптических структурированных волокон. Основным свойством фотонных кристаллов, обеспечивающим формирование полностью запрещенной фотонной зоны для некоторого интервала частот в любом направлении в кристалле, является высокий контраст модуляции коэффициента преломления. Такие структуры позволяют увеличить в десятки раз энергию поля оптического излучения в среде вблизи края фотонной запрещенной зоны, что в свою очередь значительно увеличивает эффективность нелинейного параметрического преобразования частоты излучения в тонких фотонных кристаллах. Кроме того, большая пространственная дисперсия и наличие набора блоховских мод с волновыми векторами, определяемыми векторами обратной решетки, открывают дополнительные возможности для реализации условий синхронной генерации нелинейных сигналов. Этим объясняется большой интерес к традиционным для нелинейной оптики задачам по параметрическому преобразованию частоты излучения, вынужденному комбинационному рассеянию и др. в фотонных кристаллах.

Большое количество и постоянный рост числа публикаций экспериментальных и теоретических результатов в этой области позволяют сделать заключение, что за последние 15 лет в оптике сформировалось и активно развивается новое направление исследований: оптика фотонных кристаллов. Исследования динамики формирования и распространения нелинейных уединенных волн, а также других нелинейно-оптических явлений в структурах с линейно запрещенными фотонными зонами имеют большое значение для углубления фундаментальных знаний о процессах взаимодействия излучения с веществом, они стимулируют прикладные исследования и разработки в различных областях оптики, лазерной физики и нанотехнологий.

**Цель диссертационной работы** состояла в разработке теоретических методов исследования нелинейно-оптических явлений, возникающих при распространении лазерного излучения в резонансных и квадратично-нелинейных фотонных кристаллах в условиях брэгговской дифракции, в том числе:

1. В создании нелинейной динамической теории брэгговской дифракции когерентного оптического излучения в резонансных фотонных кристаллах.

2. В исследовании динамики формирования и распространения брэгговских солитонов самоиндуцированной прозрачности в линейно запрещенной фотонной зоне.

3. В развитии теории нестационарных нелинейных уединенных волн в фотонных кристаллах.

4. В создании нелинейной теории брэгговской дифракции в случае неколлинеарной геометрии взаимодействия волн.

5. В исследовании динамики солитонов самоиндуцированной прозрачности в условиях Лауэ-геометрии дифракции лазерного излучения в резонансных фотонных кристаллах.

6. В исследовании механизмов повышения эффективности параметрического взаимодействия волн в квадратично-нелинейных фотонных кристаллах.

**Научная новизна** работы определяется впервые полученными в процессе выполнения исследований новыми результатами и состоит в следующем:

1. Создана нелинейная динамическая теория брэгговской дифракции когерентного излучения в дискретном резонансном фотонном кристалле (ФК), позволяющая с единых позиций рассматривать линейные, нелинейные и нестационарные оптические волновые процессы в таких структурах.

2. Предсказаны явления нелинейного подавления полного брэгговского отражения лазерного излучения от резонансного ФК и распространения брэгговских солитонов самоиндуцированной прозрачности в линейно запрещенной фотонной зоне периодической структуры.

3. Найдены аналитические выражения для описания нелинейных уединенных волн в резонансных ФК с неоднородно уширенной спектральной линией и в случае малого отклонения от точного условия Брэгга, а также в структурах с непрерывным пространственным распределением концентрации резонансных атомов.

4. Развита теория нестационарных нелинейных уединенных волн, получены аналитические выражения, описывающие динамику плененных и распространяющихся осциллирующих солитоноподобных импульсов в ФК.

5. Детально проанализированы процессы взаимодействия брэгговских солитонов с локализованными слабыми возбуждениями в ФК и показана возможность эффективного управления динамикой мощных оптических импульсов посредством взаимодействия с малыми возмущениями.

6. Построена нелинейная теория дифракции в случае неколлинеарной геометрии взаимодействия волн и предсказаны нелинейный эффект Бормана и Лауэ-солитон.

7. Получены новые модифицированные условия фазового синхронизма для ограниченных ФК, записанные не для точных значений эффективных волновых векторов отдельных блоховских мод, а для центров результирующих спектральных линий взаимодействующих волн.

8. Предсказано значительное возрастание эффективности параметрического преобразования частоты излучения в квадратично-нелинейном ФК при одновременном выполнении условий квазисинхронизма и несинхронного усиления трехволнового взаимодействия.

В диссертации сформулированы и обоснованы научные результаты и выводы, совокупность которых представляет собой основу **нового научного направления**:

динамика нелинейных уединенных волн в структурах с линейно запрещенными фотонными зонами.

**Научная и практическая значимость работы.** Полученные в диссертации результаты представляют возможности для развития новых теоретических и экспериментальных методов управления параметрами и динамикой распространения импульсов лазерного излучения на основе нелинейно-оптических явлений в фотонных кристаллах. Практически могут быть использованы:

- предложенный способ нелинейного просветления резонансного ФК и пороговый характер этого явления, а также возможность формирования брэгговского солитона определенной формы из импульсов произвольного вида для фильтрации и преобразования формы лазерных импульсов; предсказанные эффекты задержанного отражения и прохождения импульсов в ФК, а также нелинейный эффект Бормана для создания компактных линий задержки;
- устойчивые к возмущению плененные структурой уединенные волны, неупруго взаимодействующие со свободными солитонами, для разработки новых принципов оптической записи, считывания и хранения информации;
- возможность управления динамикой мощного импульса брэгговского солитона посредством слабого линейного возмущения или малой некогерентной инверсии атомов без введения необратимых дефектов в структуру ФК для разработки полностью оптических переключателей;
- методика расчета модифицированных условий фазового синхронизма в ограниченном ФК для расчета оптимальных условий синхронизма в ФК;
- предложенные способы повышения эффективности параметрического преобразования частоты при одновременном использовании квазисинхронного и несинхронного механизмов усиления нелинейного взаимодействия для создания компактных частотных преобразователей с размерами порядка десятков микрон и эффективностью более 10%.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Уравнения нелинейной динамической брэгговской дифракции лазерного излучения в дискретном резонансном фотонном кристалле (двухволновые уравнения

Максвелла-Блоха); эффект нелинейного подавления полного брэгговского отражения; вывод о возможности распространения нелинейных уединенных волн на брэгговской частоте в линейно запрещенной фотонной зоне; аналитические решения, физическая интерпретация и анализ свойств брэгговских солитонов самоиндуцированной прозрачности в случае точного частотного резонанса и выполнения условия Брэгга.

2. Результаты теоретических исследований динамики нелинейных уединенных волн в резонансном фотонном кристалле с неоднородно уширенной спектральной линией и в случае малого отклонения от точного условия Брэгга; аналитические решения и анализ свойств стационарных фазово-модулированных брэгговских солитонов. Постановка и решение задачи сверхизлучения в протяженном резонансном фотонном кристалле; вывод об эволюции начального состояния полностью возбужденной атомной подсистемы к двум связанным стоячим брэгговским солитонам.

3. Результаты теоретических исследований нестационарных нелинейных уединенных волн в резонансном фотонном кристалле, в том числе: уравнения для блоховского угла и координаты центра возмущенного брэгговского солитона; аналитические решения и анализ динамики плененных осциллирующих и возбужденных неустойчивых нелинейных уединенных волн; эффект задержанного отражения импульса от границы фотонного кристалла; вывод о возможности эффективного управления динамикой мощных оптических импульсов - отражение, пленение и ускорение импульсов - за счет их взаимодействий со слабым когерентным или некогерентным локальным возбуждением резонансных атомов в фотонном кристалле; анализ линейных внутренних мод возмущенного брэгговского солитона и выражение для распространяющегося с ненулевой средней скоростью осциллирующего оптического зумероноподобного импульса.

4. Уравнения нелинейной динамической брэгговской дифракции при неколлинеарной геометрии взаимодействия волн в дискретном резонансном фотонном кристалле (обобщенные двухволновые уравнения Максвелла-Блоха); постановка и решение задачи нелинейной брэгговской дифракции в геометрии Лауэ; нелинейный эффект Бормана; аналитическое решение для Лауэ-солитона. Результаты анализа динамики брэгговских солитонов в сплошных резонансных



фотонных кристаллах с непрерывным профилем пространственного распределения концентрации резонансных атомов; аналитическое решение для брэгговского солитона в случае гармонической функции концентрации двухуровневых атомов.

5. Выводы о возможности одновременного выполнения условий линейного квазисинхронизма и увеличения плотности мод основного излучения на краю фотонной запрещенной зоны фотонного кристалла и о значительном повышении в этом случае эффективности нелинейно-оптического параметрического преобразования частоты; новые условия фазового синхронизма при совпадении первых резонансов пропускания для сигналов на основной частоте и частоте второй гармоники.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на международных, всесоюзных и всероссийских конференциях и школах-семинарах: Всесоюзная/Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике (Москва, 1985; Ленинград, 1991; Ст.Петербург, 1995; Москва, 1998; Минск, 2001; Ст.Петербург, 2005); International Conference on Nonlinear Guided Waves and their Applications (Дижон, 1999; Стреза, 2002; Торонто, 2004; Дрезден, 2005); Всесоюзный/Всероссийский симпозиум по световому эхо и когерентной спектроскопии (Харьков, 1985; Куйбышев, 1989; Светлогорск, 2005); European Quantum Electronics Conference (Гамбург, 1996; Глазго, 1998); International Quantum Electronics Conference (Балтимор, 1997; Сан-Франциско, 1998; Балтимор, 1999; Ницца, 2000; Москва, 2002); Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe (Мюнхен, 2001); Annual Meeting of the IEEE Laser&Electro-Optics Society (Тусон, 2003); Всесоюзное совещание по когерентному взаимодействию излучения с веществом (Москва, 1985; Юрмала, 1988); Всероссийская конференция Фундаментальные проблемы оптики (Ст.Петербург 2000;2001;2002;2004); Всероссийская школа-семинар Волновые явления в неоднородных средах (Красновидово/Звенигород, 2000;2001;2002;2003;2004;2005); научные семинары в МГУ, ИСАН, ФИАН, МИФИ, ОИЯИ, ETH (Швейцария), КЕК (Япония), RDEC (США), Университете Дюнкерка (Франция) и др.

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликовано 111 печатных работ, в том числе: 38 статей в реферируемых российских и зарубежных журналах, 14 статей в тематических сборниках и сборниках трудов научных конференций, 59 тезисов докладов. Основные результаты диссертации опубликованы в работах, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, изложения основных результатов и выводов и списка цитированной литературы. Общий объем диссертации составляет 257 страниц, включая 55 рисунков и список цитируемой литературы из 281 наименования.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы. Выделены наиболее значительные новые результаты, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также обсуждается научная и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** дается обзор литературы, отражающей современное состояние проблем оптики фотонных кристаллов. В § 1.1 обсуждаются явления, связанные с линейным взаимодействием оптического излучения с фотонным кристаллом (ФК) и обусловленные большой пространственной дисперсией. Особое внимание уделяется эффекту увеличения плотности энергии поля, или плотности мод излучения, вблизи края фотонной запрещенной зоны. Большая часть линейно-оптических явлений в ФК связана с существованием в периодических структурах фотонных запрещенных зон, которые определяются дисперсионными соотношениями в линейной теории дифракции. Учет нелинейности взаимодействия лазерного излучения с ФК приводит к возможности распространения внутри линейно запрещенной фотонной зоны нелинейных уединенных волн, или брэгговских солитонов. Причем это явление носит общий характер и не зависит от конкретного вида нелинейности, оно было последовательно открыто для структур с кубической (Волощенко, Рыжов, Сотин (1981)), резонансной (Манцызов, Кузьмин (1984)) и квадратичной (Conti, Trillo, Assanto (1997)) нелинейностями. В этом же

порядке в § 1.2 представлен обзор основных работ по нелинейной брэгговской дифракции и динамике нелинейных уединенных волн в ФК. Рассмотрены модели нелинейных фотонных кристаллов, методы описания динамики распространения нелинейных волн в ФК и основные наблюдаемые и предсказанные явления. В § 1.3 приведен анализ результатов исследований по генерации сигналов суммарной и разностной частот в квадратично-нелинейных периодических структурах. Обсуждаются механизмы увеличения эффективности трехволнового параметрического взаимодействия в нелинейных ФК: дисперсионный фазовый синхронизм, квазисинхронизм и локализация поля в структуре.

**Во второй главе** развита полуклассическая теория нелинейной динамической брэгговской дифракции когерентного оптического излучения в дискретном резонансном фотонном кристалле. Основное внимание уделяется исследованию стационарных нелинейных уединенных волн.

В § 2.1 описана модель одномерной периодической резонансной структуры, или дискретного резонансного фотонного кристалла, и получены двухволновые уравнения Максвелла-Блоха, описывающие динамику формирования, распространения и взаимодействия нелинейных уединенных волн в условиях брэгговской дифракции.

Резонансный фотонный кристалл (РФК) представляет собой совокупность периодически расположенных тонких слоев, содержащих примесные двухуровневые атомы, в линейной диэлектрической матрице. Период структуры удовлетворяет условию Брэгга для волны падающего излучения, а частота излучения резонансна с частотой двухуровневого перехода атома. Таким образом, одновременно реализуются условия пространственного брэгговского и частотного резонансов. Когерентное взаимодействие оптического излучения с РФК описано в рамках полуклассического метода: классическое поле взаимодействует с квантовыми осцилляторами. В приближении двухволновой брэгговской дифракции выведены двухволновые уравнения Максвелла-Блоха для медленно меняющихся комплексных амплитуд электрического поля прямой и обратной блоховских волн  $E^\pm(x,t)$ , комплексного дипольного момента перехода (поляризации)  $P(x_i,t)$  и инверсии  $n(x_i,t)$  атомов:

$$\begin{aligned}
\pm c \frac{\partial \Omega^\pm(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial \Omega^\pm(x,t)}{\partial t} &= \tau_c^{-2} \sum_i \exp(-ikx_i) P(x_i, t) \tilde{\delta}(x - x_i), \\
\frac{\partial P(x_i, t)}{\partial t} &= n(x_i, t) [\Omega^+(x_i, t) \exp(ikx_i) + \Omega^-(x_i, t) \exp(-ikx_i)], \\
\frac{\partial n(x_i, t)}{\partial t} &= -\operatorname{Re} \left\{ P^*(x_i, t) [\Omega^+(x_i, t) \exp(ikx_i) + \Omega^-(x_i, t) \exp(-ikx_i)] \right\},
\end{aligned} \tag{1}$$

где  $\Omega^\pm(x, t) = 2(\mu_z / \hbar) E^\pm$  - угловые скорости вращения вектора Блоха, пропорциональные амплитудам полей  $E^\pm$ ;  $\mu_z$  - матричный элемент проекции дипольного момента перехода;  $\tau_c = (2\pi\omega\rho\mu_z^2 / \hbar)^{-1/2}$  - кооперативное время, характеризующее среднее время жизни фотона в среде до его резонансного поглощения;  $\omega$  - частота перехода;  $k$  - волновое число;  $c$  - скорость света;  $\rho$  - средняя концентрация резонансных атомов;  $x, t$  - координата вдоль нормали к резонансным плоскостям и время;  $x_i$  - координата  $i$ -ой резонансной плоскости; функция  $\tilde{\delta}(x - x_i) = 1$  при  $x \in (x_i \pm \lambda/2)$  и ноль в любых других точках;  $\lambda$  - длина волны излучения.

В § 2.2 уравнения (1) приведены к виду полностью интегрируемого уравнения син-Гордон (СГ) и получены решения для брэгговских солитонов (БС) самоиндуцированной прозрачности. В случае точного выполнения условия Брэгга

$d = \lambda$  функции  $\exp(\pm ikx_i) = 1$  и после усреднения по пространственной области  $\Delta V \gg d^3$ , где  $d$  – период решетки, при условии, что характерное время изменения амплитуд полей  $\tau \gg d/c$ , уравнения (1) записываются в континуальном пределе в виде

$$\begin{aligned}
\pm c \frac{\partial \Omega^\pm(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial \Omega^\pm(x,t)}{\partial t} &= \tau_c^{-2} P(x,t), \\
\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} &= n(x,t) [\Omega^+(x,t) + \Omega^-(x,t)], \\
\frac{\partial n(x,t)}{\partial t} &= -P(x,t) [\Omega^+(x,t) + \Omega^-(x,t)].
\end{aligned} \tag{2}$$

С помощью решения уравнений Блоха из (2) получено полностью интегрируемое уравнение СГ в релятивистски инвариантной форме для блоховского угла

$$\theta(x, t) = \int_{-\infty}^t [\Omega^+(x, t') + \Omega^-(x, t')] dt' :$$

$$c^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = 2\tau_c^{-2} \sin \theta.$$

Его многосолитонные решения  $\theta^{(n)}$  определяют динамику распространения и взаимодействия произвольного числа БС и бризеров в линейно запрещенной фотонной зоне шириной  $\Delta\omega_B = 2\sqrt{2}/\tau_c$ :

$$\Omega^\pm(x, t) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \theta^{(n)}}{\partial t} \mp c \frac{\partial \theta^{(n)}}{\partial x} \right), \quad (3)$$

$$P(x, t) = -\sin \theta^{(n)}, \quad n(x, t) = -\cos \theta^{(n)}.$$

Подробно рассмотрены структура и свойства одиночного БС самоиндуцированной прозрачности (СИП), проведено сравнение с солитоном СИП в сплошной среде. Брэгговский солитон включает в себя две встречные блоховские волны с противоположными знаками амплитуд и когерентно возбужденные резонансные атомы:

$$\Omega^\pm(x, t) = \pm \frac{c \pm v}{v\tau} \operatorname{sech} \left( \frac{x - vt}{v\tau} \right),$$

$$n(x, t) = -1 + 2 \operatorname{sech}^2 \left( \frac{x - vt}{v\tau} \right),$$

$$P(x, t) = -2 \operatorname{sech} \left( \frac{x - vt}{v\tau} \right) \operatorname{th} \left( \frac{x - vt}{v\tau} \right).$$

Скорость БС  $v = c/\sqrt{1 + 2\tau^2/\tau_c^2}$  может принимать нулевые значения, тогда протяженность импульса  $v\tau(v=0) = c\tau_c/\sqrt{2}$ , где  $\tau$  - его длительности. Энергия БС выражается формулой для релятивистской частицы  $W = W_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ , где  $W_0$  - энергия стоячего солитона, и может превышать энергию солитона в сплошной среде при тех же средних параметрах структуры в  $\sqrt{2}\tau/\tau_c \gg 1$  раз. В структуре с числом периодов  $\geq 300$  и с параметром взаимодействия  $\tau_c = 0.3$  пс при  $\tau = 0.4$  пс,

$\lambda = 800$  нм формируется БС СИП интенсивностью  $3 \text{ МВт/см}^2$ , что на три порядка меньше, чем в случае БС в среде с кубической нелинейностью.

Путем численного интегрирования уравнений (1) методом характеристик проведено моделирование процесса нелинейной брэгговской дифракции в ограниченном РФК. Показано, что при достаточно большой площади падающего импульса, превышающей пороговое значение, которое в свою очередь линейно зависит от длительности импульса, наблюдается нелинейное подавление полного брэгговского отражения падающего излучения от границы структуры и формирование в РФК брэгговского солитона СИП.

В § 2.3 исследованы стационарные нелинейные уединенные волны в РФК с неоднородно уширенной спектральной линией  $g(\Delta\omega)$  и в случае слабого отклонения от точного условия Брэгга, что важно для оценки параметров и возможности наблюдения БС в реальных твердотельных структурах. Для соответствующих двухволновых уравнений Максвелла-Блоха

$$\begin{aligned} \pm \frac{\partial \Omega^\pm(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial \Omega^\pm(x,t)}{\partial t} &= \int_{-\infty}^{\infty} P(x,t,\Delta\omega) g(\Delta\omega) d\Delta\omega, \\ \frac{\partial P(x,t,\Delta\omega)}{\partial t} + i\tau_c \Delta\omega P(x,t,\Delta\omega) &= n(x,t,\Delta\omega) [\Omega^+(x,t) + \Omega^-(x,t)], \\ \frac{\partial n(x,t)}{\partial t} &= -\text{Re} \left\{ P^*(x,t,\Delta\omega) [\Omega^+(x,t) + \Omega^-(x,t)] \right\}, \end{aligned}$$

получено решение в виде фазово-модулированного БС СИП

$$\begin{aligned} \Omega^\pm &= \frac{v \pm 1}{v\tau} \exp(i\alpha_2 \tau \varphi) \text{sech } \varphi, \\ P(x,t,\Delta\omega) &= [\beta(\Delta\omega) \text{sech } \varphi \text{th } \varphi - i\sigma(\Delta\omega) \text{sech } \varphi] e^{i(\alpha_1 x - \alpha_2 t)}, \\ n(x,t,\Delta\omega) &= -1 + 2\xi(\Delta\omega) \text{sech}^2 \varphi, \end{aligned}$$

где  $\Delta\omega = \omega - \omega_0$  - разность частот резонансного перехода атомов  $\omega$  и частоты излучения  $\omega_0$ ;  $\varphi = (x - vt)/v\tau$ ;  $v^{-2} = 1 + 2\tau^2 \int_{-\infty}^{\infty} \xi(\Delta\omega) g(\Delta\omega) d\Delta\omega$ ;  $\alpha_1 = \alpha_2/v$ ;

$$\xi(\Delta\omega) = [1 + (\alpha_2 - \tau_c \Delta\omega)^2 \tau^2]^{-1}; \quad \beta(\Delta\omega) = -2\xi(\Delta\omega); \quad \sigma(\Delta\omega) = 2\tau(\alpha_2 - \tau_c \Delta\omega)\xi(\Delta\omega);$$

$\int_{-\infty}^{\infty} (2\alpha_2 - \tau_c \Delta\omega)\xi(\Delta\omega)g(\Delta\omega)d\Delta\omega = 0$ . Здесь и ниже  $x, t, v, \tau$  - безразмерные

координаты и параметры в единицах  $c\tau_c, \tau_c, c, \tau_c$  соответственно. На примере

гауссовой формы линии показано, что неоднородное уширение приводит к увеличению скорости БС.

В случае малого отклонение от точного брэгговского условия для периода решетки  $d = (1 + \varepsilon)\lambda$ ,  $\varepsilon \ll 1$ , уравнения (1) принимают следующий вид

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Omega^\pm(x,t)}{\partial t} \pm \frac{\partial \Omega^\pm(x,t)}{\partial x} &= P(x,t) \exp(-i\gamma x), \\ \frac{\partial P(x,t)}{\partial t} &= n(x,t) [\Omega^+(x,t) \exp(i\gamma x) + \Omega^-(x,t) \exp(-i\gamma x)], \\ \frac{\partial n(x,t)}{\partial t} &= -\operatorname{Re} \{ P^*(x,t) [\Omega^+(x,t) \exp(i\gamma x) + \Omega^-(x,t) \exp(-i\gamma x)] \}.\end{aligned}$$

Найдено решение для фазово-модулированного БС:

$$\begin{aligned}\Omega^\pm &= \frac{v \pm 1}{v\tau} \exp\{i\gamma[\tau\varphi/2 \mp (x \mp t)]\} \operatorname{sech} \varphi, \\ n &= -1 + \frac{2}{1 + \tau^2\gamma^2/4} \operatorname{sech}^2 \varphi, \\ P &= \frac{1}{1 + \tau^2\gamma^2/4} \exp(i\gamma\tau\varphi/2) (-2 \operatorname{sech} \varphi \operatorname{th} \varphi + i\gamma\tau \operatorname{sech} \varphi),\end{aligned}$$

распространяющегося со скоростью  $v = [1 + 2\tau^2/(1 + \tau^2\gamma^2/4)]^{-1/2}$ , зависящей от параметра отстройки от брэгговского условия  $\gamma = 2\pi c\tau_c\varepsilon/\lambda \ll 1$ . Путем численного моделирования показана неустойчивость фазово-модулированных БС при их распространении, обнаружен переход от стационарной динамики солитоноподобного импульса к нестационарному режиму распространения осциллирующего квазиустойчивого импульса.

В § 2.4 исследован процесс генерации нелинейных уединенных волн при сверхизлучении в фотонном кристалле. Возникновение сверхизлучательного коллективного состояния объясняется фазировкой отдельных первоначально некогерентно возбужденных осцилляторов в процессе спонтанного излучения. Для строгого рассмотрения начальной стадии процесса сверхизлучения необходимо использовать квантовое описание поля и среды, однако основные особенности динамики и характеристики сверхизлучения можно получить и в полуклассическом приближении при условии адекватного выбора модели начальной стадии процесса.

Полуклассическое описание позволяет также учитывать влияние пространственной неоднородности излучения и возбуждения среды на динамику излучения, форму и характеристики импульса сверхизлучения. Численное интегрирование уравнений (1) выполнено при следующих стохастических начальных и нулевых граничных условиях:  $P(x_i, 0) = -\sin \theta_0 \exp(i\varphi_i)$ ,  $n(x_i, 0) = -\cos \theta_0$ ,  $\Omega^\pm(x, 0) = \Omega^\pm(0, t) = \Omega^\pm(l, t) = 0$ . Начальный блоховский угол принимался равным  $\theta_0 = \pi + 2/N^{1/2}$ , где  $N$  – полное число излучателей в системе, а стохастический начальный дипольный момент атома  $P(x_i, 0)$  задается независимо для каждого  $i$ -ого слоя резонансных атомов случайным выбором фазы диполя  $\varphi_i$  из интервала значений  $[0, 2\pi]$ . Показано, что результатом эволюции первоначально некогерентно возбужденного протяженного РФК является нетривиальное двухсолитонное устойчивое когерентное состояние возбужденной среды и поля – стоячий брэгговский бризер, который описывается выражениями (3), где  $\theta^{(2)}(x, t)$  - бризерное решение для двух связанных солитонов уравнения СГ.

**Третья глава** посвящена исследованию динамики нестационарных солитоноподобных волн в РФК.

В § 3.1 проведен нелинейный анализ устойчивости БС по отношению к возмущению амплитуд его блоховских волн. Показано, что если в начальный момент времени импульс имеет амплитуды блоховских волн близкие, но не равные точным значениям для БС, то начальная задача для двухволновых уравнений Максвелла-Блоха в реальных функциях сводится к задаче для модифицированного уравнения СГ

$$\theta_{xx} - \theta_{tt} = 2 \sin \theta + f_x(x),$$

где функция отстройки от точного БС  $f(x) = \Omega^+(x, 0) - \Omega^-(x, 0) + \theta_x(x, 0)$  есть инвариант движения и определяется начальными условиями. Методом интегралов движения получено уравнение движения для координаты  $\xi(t)$  центра солитоноподобного импульса в виде уравнения Ньютона  $\xi_{tt} = -U_\xi$  для квазичастицы единичной массы с потенциальной энергией взаимодействия  $U = (1/2) \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{sech}(\sqrt{2}x - \xi) f(x) dx$ .

Проведенный анализ показал, что возмущенный БС эволюционирует к точному БС, если разность амплитуд блоховских мод импульса в начальный момент времени



больше, чем у точного БС. Если же эта разность меньше точного солитонного значения, то при малой скорости импульса его энергии может быть не достаточно для формирования стационарного БС, распространяющегося с постоянной скоростью в линейно запрещенной фотонной зоне. Тем не менее, такие импульсы не распадаются, а формируют новый класс нестационарных уединенных нелинейных волн, близких по форме к БС, плененные структурой и осциллирующие вблизи возмущения  $f(x)$  с нулевой средней скоростью. В приближении малых скоростей  $\xi_i \ll 1$  получено аналитическое решение для плененного БС, которое хорошо согласуется с результатами прямого численного интегрирования. Наличие таких нелинейных уединенных волн является специфической особенностью периодических нелинейных структур с фотонными запрещенными зонами. Неупругое взаимодействие плененных и свободных БС позволяет осуществлять обмен энергией импульсов, отражение и ускорение БС.

В результате численного решения граничной задачи предсказаны эффекты задержанного отражения и задержанного прохождения импульсов, когда падающее на структуру излучение формирует почти стоячий возмущенный БС вблизи границы структуры и через некоторое время задержки либо отражается, либо распространяется в глубь среды в виде точного БС. Обнаружена экспоненциальная зависимость времени задержки от амплитуды падающего импульса.

В § 3.2 исследовано взаимодействие БС с локализованным слабым линейным статическим возбуждением в РФК, которое состоит из стоячей волны полей блоховских мод малой амплитуды и слабо когерентно возбужденных атомов и возникает, например, вблизи границы структуры при формировании БС внешним падающим импульсом. Получены аналитические выражения для амплитуд полей и поляризации атомов в таком локализованном возбуждении

$$\Omega^+(x) = -\Omega^-(x) = [\varepsilon_0 \operatorname{sech}(\sqrt{2}x) - \theta_x(x)]/2, \quad P(x) = -\theta(x),$$

$$\theta(x) = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{2}} \left\{ \sqrt{2}x \operatorname{ch}(\sqrt{2}x) - \operatorname{sh}(\sqrt{2}x) \ln[2 \operatorname{ch}(\sqrt{2}x)] \right\},$$

где  $\varepsilon_0 \ll 1$ . Энергия взаимодействия БС с линейным возбуждением определяется интегралом перекрытия функций разности амплитуд полей  $\tilde{\Omega} = \Omega^+ - \Omega^-$  и инварианта движения  $\tilde{\Omega}(x,t) + \theta_x(x,t)$  и может превышать кинетическую энергию

медленного БС-квазичастицы  $\xi_t^2/2$ . Тогда при  $\varepsilon_0 > 0$  наблюдается отражение БС с  $\tilde{\Omega} > 0$  (антикинка) и притяжение кинка ( $\tilde{\Omega} < 0$ ) слабым возбуждением, что подтверждается прямым численным интегрированием уравнений (1). Поскольку двухволновые уравнения Максвелла-Блоха при наличии ненулевого линейного возбуждения не являются полностью интегрируемыми и сводятся к модифицированному уравнению СГ, то при малых скоростях распространения взаимодействие двух солитонов в области линейного возбуждения становится неупругим. Кинк отталкивается от притягивающей его потенциальной ямы при столкновении с антикинком, а незначительное увеличение величины  $\varepsilon_0$  приводит к захвату кинка линейным возбуждением и к появлению осциллирующего БС.

Взаимодействие медленных БС с возмущениями, отличными от линейных локализованных мод, также позволяют управлять динамикой БС. В качестве примера численно исследовано взаимодействие двух БС в области некогерентно возбужденных резонансных атомов. Взаимодействие одиночного БС (как для кинка, так и для антикинка) с таким возмущением вызывает его притяжение. При встречном неупругом столкновении двух антикинков в области несимметричной инверсии атомов один из БС ускоряется, а другой захватывается возмущением. Аналогичная динамика имеет место и при столкновении кинка с антикинком в области симметричной слабой некогерентной инверсии. Сделан вывод, что в РФК имеется возможность эффективного управления динамикой мощных импульсов БС посредством слабого локализованного возбуждения резонансных атомов, то есть за счет формирования неразрушающих структуру дефектов.

В § 3.3 решена задача о возбуждении внутренних линейных мод в стоячем БС СИП с возмущенными профилями огибающих прямой и обратной блоховских волн и показано, что возможно одновременное возбуждение двух близких по форме внутренних мод на малой и нулевой частотах. Найдены выражения для полей, инверсии, поляризации и частоты осцилляций внутренних мод. Аналитически и численно показано, что в результате биений этих мод возникает периодический обмен энергией между полями внутренних мод и резонансной подсистемой двухуровневых атомов, который вызывает осцилляции инверсии атомов в БС. Далее, в § 3.4, решение обобщается на случай медленно движущегося солитона. Такой солитон уже испытывает возмущение не только за счет деформации профиля, но и

вследствие осцилляций инверсии при биениях внутренних мод, что приводит к большим осцилляциям амплитуды, поляризации и скорости импульса. Подобная динамика нелинейной уединенной волны характерна для зумерона, или осциллирующего солитона, распространяющегося с ненулевой средней скоростью. Для подтверждения того факта, что предложенное пробное аналитическое решение для зумероноподобного импульса

$$\begin{aligned}
\Omega^+ + \Omega^- &= (4v(t) / \beta\sqrt{1-v^2}) \operatorname{sech} \psi + i\varepsilon\omega \sin(\omega t) \operatorname{sech} \psi, \\
\Omega^+ - \Omega^- &= (4 / \beta\sqrt{1-v^2}) \operatorname{sech} \psi - i(\varepsilon\beta / \sqrt{1-v^2})(\cos \omega t + \varphi_0) \operatorname{sech} \psi \operatorname{th} \psi, \\
n &= (-1 + 2 \operatorname{sech}^2 \psi) (1 - (1/2)\varepsilon^2 (\cos \omega t + \varphi_0)^2 \operatorname{sech}^2 \psi), \\
P(x, t) &= -2 \operatorname{sech} \psi \operatorname{th} \psi + i\varepsilon (-1 + 2 \operatorname{sech}^2 \psi) (\cos \omega t + \varphi_0) \operatorname{sech} \psi
\end{aligned} \tag{4}$$

близко к истинному, а также для демонстрации его устойчивости проведено прямое численное интегрирование исходных уравнений, где в качестве начальных условий выбиралось аналитическое решение (4). Здесь  $\psi = \beta(x - \xi(t)) / \sqrt{1-v^2}$ ;  $\beta = \sqrt{2-\alpha}$ ;  $\varepsilon, |\alpha|, \omega \ll 1$ . Показано, что полученная при этом пространственно-временная динамика инверсии, поляризации и полей солитонных составляющих решения и внутренних мод соответствуют аналитическим выражениям (4). Интеграл движения  $Q = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\Omega} dx$  осциллирующего импульса, полученного при численном моделировании, удовлетворяет неравенству  $Q < 2\pi$ , что также соответствует аналитическому результату  $Q = 2\pi + \alpha\pi$ ,  $\alpha < 0$ . На начальном этапе эволюции решения существует слабое излучение, однако потери энергии при этом весьма малы, порядка 0.05% энергии импульса, что свидетельствует о близости пробного решения к истинному. С помощью интеграла энергии найдена зависимость скорости зумероноподобного импульса от времени.

**Глава 4** посвящена исследованию динамики нелинейных уединенных волн при неколлинеарной геометрии взаимодействия в РФК и в случае произвольного профиля пространственного распределения концентрации резонансных атомов.

В § 4.1 описана модель трехмерного дискретного РФК в виде периодически расположенных в линейной матрице малых областей (резонансных доменов) содержащих примесные двухуровневые атомы. Развита нелинейная динамическая

теория двухволновой брэгговской дифракции в общем случае выполнения векторного условия Брэгга. Из волнового уравнения Максвелла и уравнений движения для матрицы плотности двухуровневой системы получены следующие обобщенные двухволновые уравнения Максвелла-Блоха

$$\begin{aligned}
\frac{\partial E_0}{\partial \vec{r}} \vec{k}_0 + \frac{k^2}{\omega} \frac{\partial E_0}{\partial t} &= \frac{2\pi i k^2}{\varepsilon} P_s, \\
\frac{\partial E_h}{\partial \vec{r}} \vec{k}_h + \frac{k^2}{\omega} \frac{\partial E_h}{\partial t} &= \frac{2\pi i k^2}{\varepsilon} P_s, \\
\frac{dP_s}{dt} &= -\frac{i}{\hbar} \mu^2 (E_0 + E_h) \rho, \\
\frac{d\rho}{dt} &= \frac{2i}{\hbar} \left[ (E_0 + E_h) P_s^* - (E_0 + E_h)^* P_s \right],
\end{aligned} \tag{5}$$

где  $E_0$ ,  $E_h$  и  $P_s$  – медленно меняющиеся во времени и в пространстве огибающие комплексных амплитуд падающей и дифрагированной волн и поляризации среды, обусловленной резонансными атомами;  $\vec{k}_{0,h}$  – волновые вектора падающей и дифрагированной волн,  $\vec{k}_h = \vec{k}_0 + \vec{H}$ ,  $\vec{H}$  – вектор обратной решетки;  $k \equiv |\vec{k}_0| = |\vec{k}_h|$ ;  $\rho(r,t)$  – плотность инверсии атомов;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость линейной матрицы. Система уравнений (5) сводится в коллинеарном пределе к уравнениям (2), полученным выше для этого случая, однако существует и принципиальное качественное отличие этих систем: уравнения (5) позволяют решать более общие проблемы нелинейной дифракции в РФК за счет использования не только схемы дифракции в геометрии Брэгга (на отражение), но и в геометрии Лауэ (на прохождение).

В § 4.2 рассмотрена динамика нелинейных уединенных волн в РФК в условиях брэгговской дифракции по схеме Лауэ, когда полное брэгговское отражение на границе отсутствует, а дифрагирующие волны связываются благодаря брэгговскому отражению от кристаллографических плоскостей внутри структуры. В частном случае однородности амплитуд полей по  $y$ -координате вдоль вектора обратной решетки,  $\partial \Omega_{0,h} / \partial y = 0$ , найдено решение уравнений (5) для четырех блоховских мод, описывающее нелинейный эффект Бормана. Две бормановские моды являются решениями линейного уравнения  $c \cos \eta (\Omega_0 - \Omega_h)_x + (\Omega_0 - \Omega_h)_t = 0$ ,

где  $\Omega_{0,h} = 2(\mu/\hbar)E_{0,h}$ ,  $\Omega_0 + \Omega_h = 0$ ,  $\eta$  - угол между волновыми векторами и  $x$ -координатой вдоль кристаллографических плоскостей. Эти волны имеют минимумы амплитуд на кристаллографических плоскостях, сформированных из резонансных доменов, поэтому эффективно с ними не взаимодействуют и распространяются как линейные бормановские волны. Пара антибормановских мод описываются нелинейным уравнением СГ в нерелятивистской форме  $c \cos \eta \theta_{xt} + \theta_{tt} = -2\tau_c^{-2} \sin \theta$ , аналогичным случаем СИП в сплошной среде, где  $\theta(x,t) = \int_{-\infty}^t [\Omega_0(x,t') + \Omega_h(x,t')] dt'$ ,  $\Omega_0 - \Omega_h = 0$ . Антибормановские моды формируют Лауэ-солитон

$$\Omega_0 = \Omega_h = \tau^{-1} \operatorname{sech}[(x - vt)/v\tau], \quad n = -1 + 2 \operatorname{sech}^2[(x - vt)/v\tau],$$

распространяющийся со скоростью  $v = c \cos \eta / (1 + 2\tau^2/\tau_c^2)$  вдоль нормали к вектору обратной решетки. Представленные результаты численного интегрирования уравнений (5) с граничными условиями в виде одиночной волны  $\Omega_0(x=0; y, t) = \Omega_0'(y) \operatorname{sech}(t - t_0/\tau_0)$  подтверждают аналитические результаты. В структуре возбуждаются два импульса: быстрый линейный, движущийся со скоростью  $c \cos \eta$  без возбуждения среды, и медленный Лауэ-солитон самоиндуцированной прозрачности.

В § 4.3 рассмотрены особенности динамики БС при неколлинеарной геометрии взаимодействия волн. Показано, что появление дополнительного свободного параметра, угла дифракции  $\eta$ , дает возможность уменьшить скорость распространения импульса при сохранении неизменными его длительности и амплитуд блоховских мод. Таким образом, использование неколлинеарной схемы дифракции позволяет изменять скорость БС не только за счет изменения соотношения амплитуд блоховских мод (или длительности импульса), но и за счет изменения параметров структуры, которые определяют угол дифракции  $\eta$ , например, периода. Это весьма существенно с точки зрения управления динамикой БС, так как именно медленный солитон может быть легко остановлен, захвачен или отражен возмущением. Численно показана возможность формирования решетки стоячих БС.

В § 4.4 проведено обобщение результатов нелинейной теории брэгговской дифракции на широкий класс структур в виде непрерывных РФК, у которых функция пространственного распределения концентрации резонансных атомов представляет собой не дискретную решетку, а достаточно произвольную непрерывную функцию. Совершенные непрерывные РФК с большим числом периодов могут быть изготовлены методом фотополимеризации при наличии в растворе мономеров наночастиц, содержащих примесные резонансные атомы. Для описания взаимодействия лазерного излучения с такими структурами получена система самосогласованных двухволновых уравнений Максвелла-Блоха, которая в частном случае модуляции концентрации резонансных атомов по гармоническому закону сводится к следующей точно интегрируемой системе

$$\begin{aligned}\Omega_t^+(x,t) + \Omega_x^+(x,t) &= (1/4)P^+(x,t) + (1/2)P^-(x,t), \\ \Omega_t^-(x,t) - \Omega_x^-(x,t) &= (1/2)P^+(x,t) + (1/4)P^-(x,t), \\ P_t^\pm(x,t) &= n(x,t)\Omega^\mp(x,t), \\ n_x(x,t) &= -\text{Re}\left[P^{*-}(x,t)\Omega^+(x,t) + P^{*+}(x,t)\Omega^-(x,t)\right],\end{aligned}$$

где  $P^\pm(x,t) = \left\langle P(x,t)e^{\pm ikx} \right\rangle_\lambda$ . Получено аналитическое решение для брэгговского импульса СИП, численно показана возможность его возбуждения внешним падающим на структуру излучением. Численное моделирование позволило продемонстрировать солитоноподобные свойства найденного аналитического решения. Импульсы, движущиеся с большими скоростями  $v \geq 0.8$ , при распространении сохраняют форму и скорость неизменными и взаимодействуют упруго. Проведено моделирование дискретного РФК с помощью непрерывной функции концентрации резонансных атомов. Получено совпадение параметров БС в таких структурах с аналитическими выражениями для параметров БС в дискретном РФК.

**Глава 5** посвящена исследованию эффективности трехволнового параметрического взаимодействия волн в нелинейном фотонном кристалле.

С точки зрения повышения эффективности генерации сигналов второй гармоники (ВГ) и суммарной частоты (СЧ) особый интерес представляет изучение процессов нелинейно-оптического взаимодействия волн при одновременном выполнении условий квазисинхронизма и усиления взаимодействия за счет

увеличения плотности энергии полей на основных частотах вблизи краев области селективного брэгговского отражения (несинхронный механизм усиления). Решению этой задачи посвящен параграф § 5.1. Теоретическое описание проведено в приближении заданного поля методом матриц переноса излучения, который позволяет точно и полностью решить поставленную задачу для ограниченного одномерного нелинейного фотонного кристалла. В качестве примера рассмотрены процессы генерации волн СЧ и ВГ в структуре  $ZnS/SrF_2$  с оптической толщиной слоев, равной  $3/4$  длины волны, и периодической модуляцией нелинейной и линейной восприимчивостей с большим контрастом линейного показателя преломления  $\Delta n \sim 1$ . Показана возможность увеличения интенсивности сигналов ВГ и СЧ более чем на порядок при одновременном точном выполнении условий квазисинхронизма и несинхронного усиления. В случае генерации ВГ помимо точного выполнения условия квазисинхронизма, приближенно также выполняется и условие синхронизма за счет дисперсионного механизма, которое достигается благодаря совпадению при определенном угле падения максимума кривой угловой зависимости эффективного коэффициента преломления на основной частоте и его минимума на частоте ВГ. Теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными Балакиным и др. (1999, 2001).

В § 5.2 на примере генерации сигнала ВГ в неколлинеарной геометрии взаимодействия волн показано, что в тонком одномерном ФК возможно увеличение эффективности генерации сигнала ВГ при совпадении первых резонансов пропускания основной волны и сигнала ВГ. В этом случае не выполняются условия фазового синхронизма, рассчитанные в традиционном приближении узких линий пространственного спектра эффективных блоховских мод, тем не менее, интенсивность такого сигнала более чем на порядок превосходит интенсивность сигнала ВГ, для которого удовлетворяются традиционные условия синхронизма в приближении узких спектральных линий. Объяснение этого эффекта становится возможным при переходе к многомодовой задаче с учетом эффективного перекрытия пространственных спектров как основных, так и генерируемых волн. Получены выражения для модифицированных условий фазового синхронизма, записанные для центров результирующих линий пространственных спектров взаимодействующих волн. Рассмотрены случаи сильной и слабой брэгговской

дифракции излучения в ФК. Показано, что в этих случаях условия синхронизма значительно отличаются и совпадают с традиционными условиями компенсации фазовой расстройки лишь для проходящих сигналов в случае слабой дифракции.

Теоретический анализ процессов генерации сигналов второй гармоники и суммарной частоты при несинхронном и синхронном усилениях проводился в предыдущих параграфах методом матриц переноса излучения в рамках приближения заданного поля, что не позволяет оценить абсолютную величину эффективности генерации нелинейных сигналов. В § 5.3 эта задача решена с использованием динамических нелинейных волновых уравнений второго порядка по пространственной переменной, которые описывают как динамику перекачки энергии волны накачки в генерируемый сигнал, так и нелинейный сдвиг фаз волн в процессе их взаимодействия. Показано, что при одновременном выполнении условий синхронного и несинхронного усилений в одномерном ФК эффективность генерации отраженного и прошедшего нелинейных сигналов ВГ существенно меняется в зависимости от длительности импульса. Вид кривой отражения сигнала накачки также претерпевает значительные изменения. Эффективность генерации ВГ при этом может превышать 10% для структуры толщиной 10 мкм при длительности импульса накачки порядка 200-300 фс.

Для большинства оптически нелинейных кристаллов показатель преломления в важном с точки зрения практических приложений терагерцовом (ТГц) диапазоне частот (длины волн  $\lambda \sim 0.05-3$  мм) может значительно превышать соответствующие значения в видимой области спектра. По этой причине практически всегда невозможно осуществить условие фазового синхронизма. Кроме того, большое поглощение в субмиллиметровой области накладывает жесткие ограничения на предельную толщину нелинейного кристалла. Поэтому в § 5.4 предложено использовать несинхронный механизм усиления параметрического взаимодействия при генерации излучения разностной частоты в тонком одномерном ФК. Показано, что при этом значительно повышается интенсивность сигнала разностной частоты в уединенном нелинейном ФК. Формирование же из ФК сверхрешетки с пространственным периодом, близким к длине волны ТГц диапазона, позволяет повысить интенсивность генерируемого ТГц сигнала на три порядка по сравнению со сплошной средой. Это происходит благодаря одновременному выполнению



условий несинхронного усиления и линейного квазисинхронизма в сверхрешетке за счет вектора обратной решетки сверхструктуры. Причем как несинхронное усиление, так и квазисинхронизм наилучшим образом реализуются в структурах с небольшим числом кристаллов и периодов сверхрешетки. Поэтому для получения интенсивных нелинейных сигналов достаточно использовать компактную структуру, что в значительной степени позволяет решить проблему поглощения ТГц излучения в ФК.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На примере предложенной модели одномерного дискретного резонансного фотонного кристалла (РФК) развита полуклассическая теория нелинейной динамической брэгговской дифракции оптического излучения в такой структуре. Методом медленно меняющихся амплитуд получена система двухволновых уравнений Максвелла-Блоха для огибающих амплитуд блоховских мод, дипольного момента перехода и инверсии двухуровневых осцилляторов резонансной среды, описывающая когерентное нелинейное взаимодействие лазерного излучения с РФК в условиях брэгговской дифракции.

2. Найдено односолитонное решение указанных уравнений, описывающее распространение нелинейной уединенной волны в линейно запрещенной области частот селективного брэгговского отражения - брэгговский солитон (БС) самоиндуцированной прозрачности. Проведен детальный теоретический анализ основных физических закономерностей процессов формирования и распространения БС, в частности, показана возможность распространения БС с малой и нулевой скоростями, причем порог возбуждения для БС в РФК на три порядка ниже по интенсивности, чем для БС в средах с керровской нелинейностью. Предсказаны явления нелинейного подавления полного брэгговского отражения на границе РФК и просветления линейной фотонной запрещенной зоны нелинейными уединенными волнами. Получено полное многосолитонное решение, описывающее динамику распространения и взаимодействия произвольного числа БС и двухсолитонных импульсов (бризеров).

3. Исследована динамика нелинейных уединенных волн в РФК с неоднородно уширенной спектральной линией и при слабом отклонении от брэгговского условия. Получены точные решения для фазово-модулированных брэгговских солитонов в таких структурах.

4. В полуклассическом приближении численно решена задача сверхизлучения в РФК и показано, что результатом эволюции первоначально некогерентного состояния возбужденных атомов протяженного РФК является устойчивое когерентное состояние возбужденной среды и поля в виде двух связанных брэгговских солитонов.

5. Исследована динамика возмущенного БС, который в начальный момент времени имеет амплитуды блоховских волн близкие, но не равные точным значениям для БС. Показано, что в этом случае начальная задача для двухволновых уравнений Максвелла-Блоха в реальных функциях сводится к задаче для модифицированного уравнения  $\sin$ -Гордон. Получено уравнение движения для координаты центра устойчивого связанного осциллирующего солитоноподобного импульса и неустойчивого возбужденного импульса, который распадается на бегущий БС и возмущение. Новый вид нестационарных нелинейных уединенных волн – плененные структурой осциллирующие брэгговские солитоны – имеют разность амплитуд прямой и обратной волн меньшую, чем у стоячего БС, и в общем случае осциллирующую амплитуду и скорость, однако их средняя скорость распространения равна нулю. В результате численного решения граничной задачи предсказаны эффекты задержанного отражения и задержанного прохождения, когда падающий на структуру импульс формирует почти стоячий возмущенный БС вблизи границы структуры и через некоторое время задержки либо отражается, либо распространяется в глубь среды в виде точного БС.

6. В результате исследования взаимодействия точного БС самоиндуцированной прозрачности с локализованным слабым линейным когерентным возбуждением одномерного РФК показано, что это взаимодействие кардинально меняет динамику БС и может привести к его отражению или захвату, а также к изменению скорости распространения БС в результате неупругого взаимодействия двух точных БС при их столкновении в области локализации слабого возмущения. Аналогичная динамика БС наблюдается при взаимодействии с

локализованной областью некогерентно возбужденных резонансных атомов. Таким образом, продемонстрирована возможность управления динамикой мощного импульса БС посредством слабого возмущения РФК без введения необратимых структурных дефектов.

7. Найдены выражения для линейных внутренних мод стоячего БС, близких по форме, но отличающихся по частоте. Показано, что такие свойства внутренних мод вызывают их эффективные биения и, как следствие, - осцилляции энергии самого солитона. В случае же движущегося с ненулевой средней скоростью медленного БС биения внутренних мод приводят к зумероноподобной динамике импульса, то есть к значительным периодическим изменениям его скорости, амплитуды, инверсии и поляризации.

8. Развита теория нелинейной динамической брэгговской дифракции в РФК при неколлинеарной геометрии взаимодействия волн. Полученные обобщенные двухволновые уравнения Максвелла-Блоха позволяют решать задачи распространения резонансного излучения в фотонных кристаллах как в условиях дифракции в геометрии Брэгга, так и в геометрии Лауэ. В последнем случае предсказан нелинейный эффект Бормана, когда возбуждаемые в структуре четыре волны поля формируют два импульса: первый - линейно взаимодействующий со средой, соответствующий линейному эффекту Бормана и состоящий из бормановских мод, и второй - Лауэ-солитон самоиндуцированной прозрачности, который представляет собой нелинейную уединенную волну, сформированную двумя антибормановскими модами.

9. Построена теория нелинейной брэгговской дифракции в случай непрерывного РФК, в котором функция пространственного распределения концентрации резонансных атомов представляет собой не дискретную решетку, а достаточно произвольную непрерывную функцию. Получена система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику нелинейных уединенных волн в таких структурах. В случае гармонической функции концентрации резонансных атомов получено точное решение в виде БС с параметрами, отличными от БС в дискретном РФК. С помощью численного моделирования продемонстрировано нелинейное подавление полного брэгговского отражения и

распространение солитоноподобных волн в РФК в случае негармонических функций концентрации резонансных атомов.

10. Детально исследованы возможности одновременной реализации различных механизмов усиления нелинейно-оптического параметрического преобразования частоты излучения в нелинейных одномерных ФК при коллинеарной геометрии взаимодействия волн. Задача решена в приближении заданного поля волн накачки методом матриц переноса излучения. Показано, что при одновременном выполнении условий квазисинхронизма и увеличения плотности энергии полей на основных частотах вблизи краев области селективного брэгговского отражения (несинхронного механизма усиления взаимодействия) более чем на порядок возрастает интенсивность генерируемых полей второй гармоники и суммарной частоты. Представленные теоретические результаты получили экспериментальное подтверждение.

11. Рассмотрен процесс эффективной генерации сигнала второй гармоники в конечном одномерном ФК при неколлинеарной геометрии взаимодействия волн в условиях реализации несинхронного механизма усиления. Показано, что в конечном ФК возможна синхронная генерация сигнала второй гармоники, для которого не выполнены традиционные условия фазового синхронизма, рассчитанные в приближении узких линий пространственного спектра эффективных блоховских мод, причем интенсивность этого сигнала более чем на порядок превосходит интенсивность сигнала второй гармоники, для которого выполняются традиционные условия фазового синхронизма. Это явление объясняется существованием в структуре различных блоховских волн с близкими по величине амплитудами, волновыми числами и ширинами пространственных спектров. Получены выражения для модифицированных условий фазового синхронизма, записанные не для точных значений эффективных волновых векторов отдельных блоховских мод, а для центров результирующих спектральных линий взаимодействующих волн. Показано, что условия синхронизма значительно отличаются в случаях сильной и слабой дифракций излучения и совпадают с традиционными условиями компенсации фазовой расстройки лишь для проходящих сигналов в случае слабой дифракции.

12. В рамках динамической теории параметрического взаимодействия волн, учитывающей обмен энергией между взаимодействующими волнами, численно

решена задача генерации сигналов второй гармоники в тонких одномерных периодических структурах в условиях синхронного и несинхронного взаимодействий. Показано, что в периодической структуре толщиной 10 мкм эффективность преобразования импульса накачки в сигнал второй гармоники может достигать 10%, что на два порядка выше, чем в сплошной среде той же толщины.

13. Показано, что несинхронное усиление взаимодействия волн значительно повышает интенсивность сигнала разностной частоты в терагерцовом диапазоне в уединенном нелинейном ФК. Формирование же сверхрешетки фотонных кристаллов с пространственным периодом, близким к длине волны терагерцового диапазона, позволяет повысить интенсивность генерируемого терагерцового сигнала на три порядка по сравнению со сплошной средой той же толщины. Это происходит благодаря возможности точного удовлетворения условиям несинхронного усиления и квазисинхронизма за счет компенсации расстройки волновых векторов взаимодействующих волн вектором обратной решетки сверхструктуры.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Бушуев В.А., Манцызов Б.И., Кузьмин Р.Н. О влиянии теплового расширения на возможность генерации в гамма-лазере.// Квантовая электроника, т.7, № 5, с.1115-1117 (1980).
2. Манцызов Б.И., Бушуев В.А., Кузьмин Р.Н. Влияние теплового режима на порог генерации мессбауэровского  $\gamma$ -излучения в системе возбужденных ядер.// ЖЭТФ, т.80, № 3, с.891-896 (1981).
3. Галкин В.Я., Манцызов Б.И., Серебряков С.Л. Численные исследования квазиклассической модели кинетики вынужденного  $\gamma$ -излучения с учетом температурного разогрева.// Вестн. Моск. универ., сер.15, вычислит.матем. и кибер., № 1, с.17-24 (1983).
4. Манцызов Б.И., Бушуев В.А., Кузьмин Р.Н., Серебряков С.Л. Особенности режима сверхизлучения протяженных сред.// ЖЭТФ, т.85, № 3(9), с.862-868 (1983).

5. Манцызов Б.И., Кузьмин Р.Н. Самоиндуцированное подавление брэгговского рассеяния импульса резонансного излучения в периодической среде.// Письма в ЖТФ, т.10, № 14, с.857-860 (1984).
6. Манцызов Б.И., Кузьмин Р.Н. О когерентном взаимодействии света с дискретной периодической резонансной средой.// ЖЭТФ, т.91, № 1(7), с.65-77 (1986).
7. Манцызов Б.И., Гамзаев Д.О. Условия формирования двухволнового солитона в резонансной среде.// Оптика и спектроскопия, т.63, № 1, с.200-202 (1987).
8. Mantsyzov B.I. Optical solitons in periodic resonance media.// Journal of Quantum Nonlinear Phenomena, v.1, No 2, p.173-178, 1992.
9. Манцызов Б.И. Солитоны в периодических резонансных средах.// Изв. РАН, сер.физическая, т.56, № 9, с.14-19 (1992).
10. Лакоба Т.И., Манцызов Б.И. О когерентном взаимодействии импульса света с неоднородной нелинейной брэгговской решеткой.// Изв. РАН, сер.физическая, т.56, № 8, с.113-118 (1992).
11. Mantsyzov B.I. Gap  $2\pi$ -pulse with an inhomogeneously broadened line and an oscillating solitary wave.// Phys.Rev. A, v.51, No 6, 4939-4943 (1995).
12. Balakin A.V., Boucher D., Bushuev V.A., Koroteev N.I., Mantsyzov B.I., Masselin P., Ozheredov I.A., and Shkurinov A.P. Enhancement of second-harmonic generation with femtosecond laser pulses near the photonic band edge for different polarizations of incident light.// Optics Letters, v.24, №12, 793-795 (1999).
13. Балакин А.В., Буше Д., Бушуев В.А., Манцызов Б.И., Масселин П., Ожередов И.А., Шкуринов А.П. Усиление генерации сигнала суммарной частоты в многослойных периодических структурах на краях брэгговской запрещенной зоны.// Письма в ЖЭТФ, т.70, № 11, 718-721 (1999).
14. Mantsyzov B.I. Laue soliton in resonantly absorbing photonic crystal.// Optics Communications, v.189, 275-280 (2001).
15. Balakin A.V., Bushuev V.A., Mantsyzov B.I., Ozheredov I.A., Petrov E.V., Shkurinov A.P., Masselin P. and Mouret G. Enhancement of sum frequency generation near the photonic band gap edge under the quasi-phase-matching conditions.// Phys. Rev. E , v.63, 046609 (2001).
16. Манцызов Б.И., Сильников Р.А. Осциллирующий брэгговский  $2\pi$ -импульс в резонансно поглощающей решетке.// Письма в ЖЭТФ, т. 74, №9, 511-514 (2001).

17. Манцызов Б.И., Сильников Р.А. Осцилляции брэгговского солитона в резонансной решетке.// Изв. РАН, сер. физическая, т.65, №12, с.1747-1750 (2001).
18. Бушуев В.А., Манцызов Б.И., Петров Е.В. Усиление сигнала суммарной частоты в одномерных фотонных кристаллах при неколлинеарной геометрии взаимодействия волн.// Изв. РАН, сер. физическая, т.65, №12, 1753-1757 (2001).
19. Бушуев В.А., Манцызов Б.И., Прямиков А.Д. Влияние дифракционных эффектов на усиление генерации второй гармоники в одномерных фотонных кристаллах.// Перспективные материалы, №5, с.5-15 (2001).
20. Бушуев В.А., Манцызов Б.И., Прямиков А.Д. Анализ эффективности генерации второй гармоники в одномерных фотонных кристаллах в зависимости от длины волны и толщины слоев.// Перспективные материалы, №6, с.38-44 (2001).
21. Mantsyzov B.I., Silnikov R.A. Unstable excited and stable oscillating gap  $2\pi$ -pulses.// J.Opt.Soc.Am. B, v.19, No.9, p.2203-2207 (2002).
22. Манцызов Б.И., Петров Е.В. Повышение эффективности генерации сигнала удвоенной частоты в широком интервале длин волн в одномерных структурах с фотонными запрещенными зонами.// Изв. РАН, сер. физическая, т.66, №12, с.1787-1792 (2002).
23. Khomutov G.B., Beresneva I.V., Bykov I.V., Gainutdinov R.V., Koksharov Yu.A., Mantsyzov B.I. et al. Formation of polymer films containing multivalent metal cations by stepwise alternate adsorption of metal cations and polyanions.// Colloids and Surfaces A, v.198-200, p.491-499 (2002).
24. Манцызов Б.И., Сильников Р.А. Взаимодействие брэгговских солитонов со слабыми линейными модами в фотонных кристаллах.// Изв. РАН, сер. физическая, т.67, №12, с.1719-1722 (2003).
25. Петров Е.В., Манцызов Б.И. Влияние размерных эффектов на эффективность генерации сигнала второй гармоники в тонких одномерных фотонных кристаллах.// Изв. РАН, сер. физическая, т.67, №12, с.1723-1728 (2003).
26. Бушуев В.А., Манцызов Б.И. Несинхронное усиление при генерации терагерцового излучения в нелинейном одномерном фотонном кристалле.// Изв.РАН, сер.физическая, т.67, №12, с.1714-1718 (2003).

27. Mantsyzov B.I., Mel'nikov I.V., Aitchison J.S. Controlling light by light in a one-dimensional resonant photonic crystal.// *Phys. Rev. E*, v.69, 055602(R) (2004).
28. Mel'nikov I.V., Aitchison J.S., Mantsyzov B.I. Gap soliton dynamics in a nonuniform resonant structure.// *Optics Letters*, v.29, No 3, 289-291 (2004).
29. Петров Е.В., Манцызов Б.И. Повышение эффективности генерации терагерцовых сигналов в условиях брэгговской дифракции в периодических структурах.// *Изв. РАН, сер. физическая*, т.68, №12, с.1714-1719 (2004).
30. Манцызов Б.И., Петров Е.В., Терешин Е.Б., Трофимов В.А. Динамика генерации второй гармоники в тонких одномерных структурах с фотонными запрещенными зонами.// *Изв. РАН, сер. физическая*, т.68, №12, с.1710-1713 (2004).
31. Mantsyzov B.I., Mel'nikov I.V., Aitchison J.S. Dynamic control over optical solitons in a resonant photonic crystal.// *IEEE J. Select Topics Quantum Electron.*, v.7, No5, 893-899 (2004).
32. Петров Е.В., Манцызов Б.И. Генерация сигналов терагерцового диапазона в сверхрешетке фотонных кристаллов.// *Изв. РАН, сер. физическая*, т.69, №8, с.1113-1115 (2005).
33. Манцызов Б.И. Оптический зумерон.// *Изв. РАН, сер. физическая*, т.69, №12, с.1789-1793 (2005).
34. Манцызов Б.И., Петров Е.В., Федотов М.В. Брэгговский солитон самоиндуцированной прозрачности в периодической структуре с произвольной модуляцией плотности резонансных атомов.// *Изв. РАН, сер. физическая*, т.70, №1, с.144-148 (2006).
35. Бушуев В.А., Манцызов Б.И., Петров Е.В. Усиление генерации терагерцового излучения в нелинейном одномерном фотонном кристалле с микрорезонатором.// *Изв. РАН, сер. физическая*, т.69, №12, с.1799-1804 (2005).
36. Манцызов Б.И. Оптический зумерон как результат биений внутренних мод брэгговского солитона.// *Письма в ЖЭТФ*, т.82, №5, с.284-289 (2005).
37. Петров Е.В., Манцызов Б.И. Изменения условий фазового синхронизма при генерации сигнала второй гармоники в конечном одномерном фотонном



кристалле вблизи условия Брэгга: случаи слабой и сильной дифракций.// ЖЭТФ, т.128, №3, с.464-475 (2005).

38. Mantsyzov B.I., Nasu K. Gap  $2\pi$ -pulse and zoomeron-like pulse propagation and interaction in resonant Bragg structure.// Proceedings of SPIE, v.2798, p.121-124 (1996).
39. Mantsyzov B.I. Optical solitons in periodic resonance media.// in Research in Quantum Optics, ed. by A.S.Shumovsky et al (Nova Science Publishers, NY, 1996) p.113-118.
40. Mantsyzov B.I. Nonlinear solitary waves in two- and three-dimensional resonant periodic structures.// in International Quantum Electronics Conference, Technical Digest, p.108-109 (San Francisco, 1998).
41. Mantsyzov B.I. Laue soliton in photonic crystal.// in Nonlinear Guided Waves and Their Applications, OSA Technical Digest, p.235-237 (Dijon, 1999).
42. Balakin A.V., Bushuev V.A., Koroteev N.I., Mantsyzov B.I., Ozheredov I.A., Shkurinov A.P., Boucher D., Masselin P. Femtosecond second-harmonic and sum-frequency generation near the photonic band edge in one-dimension periodic media.// in Nonlinear Guided Waves and Their Applications, OSA Technical Digest, p.244-246 (Dijon, 1999).
43. Mantsyzov B., Fedotov M., Pospelova A. Nonlinear solitary waves in multidimensional resonant photonic bandgap structures.// Proceedings of SPIE, v. 3736, p.211-220 (1999).
44. Mantsyzov B.I., Silnikov R.A. Instability of gap  $2\pi$ -pulses.\\ in Nonlinear Guided Waves and their Applications, OSA Technical Digest, NLMD8, p.1-3 (Italy, Stresa, 2002).
45. Mantsyzov B.I. Moving oscillating gap  $2\pi$  pulses and their interaction.// in Nonlinear Guided Waves and their Applications on CD-ROM, MC2, p.1-3 (Toronto, 2004).
46. Petrov E.V., Bushuev V.A., Mantsyzov B.I. Effective THz signal generation in one-dimensional photonic band gap structures arranged into THz superlattice.// in Nonlinear Guided Waves and their Applications on CD-ROM, TuC35, p.1-3 (Toronto, 2004).
47. Петров Е.В., Манцызов Б.И. Генерация сигналов ТГц диапазона в сверхрешетке фотонных кристаллов.// Труды Конференции Фундаментальные проблемы оптики, с.100-103 (Ст.Петербург, 2004).

48. Mantsyzov B.I. Optical zoomeron.// in Int. Conference on Coherent and Nonlinear Optics, Technical Digest on CD, IFI6 (St.Petersburg, 2005).
49. Mantsyzov B.I. Gap soliton internal modes beating and optical zoomeron.// in Nonlinear Guided Waves and their Applications on CD-ROM, WD34, p.1-3 (Dresden, 2005).
50. Mantsyzov B.I., Petrov E.V. Analytical solution for gap soliton of self-induced transparency in structure with cosine-modulated density of resonant atoms.// in Nonlinear Guided Waves and their Applications on CD-ROM, WD35, p.1-3 (Dresden, 2005).