

На правах рукописи



ШУТОВ Иван Владимирович

**Многоволновые нелинейно-оптические
взаимодействия в средах с пространственной
модуляцией квадратичной восприимчивости**

Специальность 01.04.21 — лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

22 ОКТ 2009

Москва — 2009

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Чиркин Анатолий Степанович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Китаева Галия Хасановна,
кафедра квантовой электроники
МГУ имени М.В. Ломоносова

кандидат технических наук,
Гречин Сергей Гаврилович,
кафедра РЛ1 МГТУ
имени Н.Э. Баумана

Ведущая организация: Научный центр волновых исследований
Учреждения Российской академии наук
Института общей физики
имени А.М.Прохорова

Защита состоится «19» ноября 2009 года в 17³⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 501.001.31 при Московском государственном
университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1,
Москва, Ленинские горы, дом 1, стр. 62, Корпус нелинейной оптики,
аудитория имени С.А. Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического фа-
культета МГУ

Автореферат разослан « 12 » октября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 501.001.31, доцент

Челышев



Т.М. Косыгина

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1. Актуальность проблемы

В настоящее время нелинейно-оптические преобразователи частоты лазерного излучения находят применение в различных областях науки и техники. Среди них наиболее широко используются преобразователи, основанные на трехчастотных нелинейно-оптических взаимодействиях. Они лежат в основе существующих на сегодняшний день, например, источников перестраиваемого интенсивного когерентного излучения, преобразователей сверхкоротких лазерных импульсов, источников сжатого (неклассического) света и перепутанных квантовых состояний квадратурных компонент светового поля и чисел фотонов. Реализация трехчастотных волновых взаимодействий возможна как в однородных нелинейно-оптических кристаллах, так и в нелинейных фотонных кристаллах (НФК), в которых знак квадратичной восприимчивости меняется от домена к домену (их называют также периодически поляризованными нелинейными кристаллами или кристаллами с регулярной доменной структурой). В НФК осуществляются квазисинхронные волновые взаимодействия, в которых волновая расстройка взаимодействующих волн Δk компенсируется вектором обратной «нелинейной» решетки $K = \frac{2\pi m}{\Lambda}$, где Λ — период модуляции знака нелинейной восприимчивости второго порядка, $m = \pm 1, \pm 3, \dots$ — порядок квазисинхронизма.

Вместе с тем одновременная реализация нескольких трехчастотных нелинейно-оптических процессов с общими волнами позволяет осуществлять значительно более сложные преобразования частот. Это представляет интерес с точки зрения создания компактных источников когерентного многочастотного излучения в широком спектральном диапазоне. Кроме того, реализация связанных параметрических процессов вызывает интерес в квантовой оптике для создания многомодовых перепутанных состояний, которые являются важным ресурсом в квантовой информации и квантовых вычислениях.

Для реализации таких взаимодействий необходимо, однако, удовлетворить условиям эффективного взаимодействия волн одновременно для нескольких трехчастотных нелинейно-оптических процессов. Фактически в этом случае мы имеем дело со связанными многоволновыми взаимодействиями. В однородном кристалле задача осуществления многоволновых взаимодействий представляет собой сложную проблему. В то же время в виду зависимости вектора обратной «нелинейной» решетки K НФК от двух параметров (Λ и m), есть возможность реализовать несколько (обычно два) трехчастотных квазисинхронных нелинейно-оптических процесса путем подбора этих параметров. Такие процессы получили название последовательных. Однако в этом случае порядок квазисинхронизма сильно влияет на эффективность взаимодействия, поскольку коэффициент нелинейной связи волн обратно про-

порционален порядку квазисинхронизма. Кроме того, стоит заметить, что для реализации связанных взаимодействий для заданных длин волн и конкретного нелинейного кристалла не всегда удастся подобрать соответствующие период Λ и порядки квазисинхронизма.

В связи с ограниченностью возможностей НФК с периодической нелинейной структурой в последнее время ведутся поиски способов конструирования и создания новых типов структур для реализации многоволновых процессов. Например, протекание одновременно двух нелинейно-оптических взаимодействий волн с кратными частотами в последние годы исследовалось в аперiodических нелинейных структурах типа Фибоначчи.

Реализация многоволновых квазисинхронных взаимодействий без ограничения на соотношения частот взаимодействующих волн допускают аперiodические НФК (АНФК), конструируемые методом суперпозиции модуляции нелинейности, который детально исследуется в диссертационной работе (более подробно о методе см. ниже). Являясь относительно простым алгоритмом построения аперiodической нелинейной решетки, данный метод позволяет снять ограничения, накладываемые дисперсионными характеристиками нелинейных кристаллов на совокупность возможных связанных многоволновых процессов. Помимо этого, метод допускает управление эффективными коэффициентами нелинейной связи волн, вовлеченных во взаимодействие.

Особый интерес представляет реализация многоволновых процессов в активно-нелинейных кристаллах, в которых наряду с нелинейно-оптическими процессами одновременно имеет место генерация лазерного излучения.

2. Цель диссертационной работы

Основной целью диссертационной работы является детальное изучение многоволновых нелинейно-оптических процессов, реализуемых в кристаллах с аперiodической нелинейной структурой, конструируемой методом суперпозиции пространственной модуляции нелинейной восприимчивости.

В работе решаются следующие задачи.

1. Установление связи вида аперiodической структуры с амплитудами пространственных гармоник, связанных с соответствующим квазисинхронным процессом и определяющих эффективный коэффициент нелинейной связи волн.
2. Изучение процесса невырожденного параметрического усиления при низкочастотной накачке.
3. Исследование возможности генерации высших гармоник оптического излучения с учетом полосы прозрачности АНФК LiNbO_3 .
4. Анализ влияния неточности создания аперiodической структуры на протекание многоволновых процессов в АНФК.

5. Исследование последовательных нелинейно-оптических процессов в активных НФК в режиме модуляции добротности резонатора.
6. Изучение особенностей углового спектра генерации второй гармоники в периодической нелинейной структуре в схеме Лауэ широкополосным лазерным излучением.

3. Научная новизна

1. Детально исследован метод суперпозиции модуляции нелинейной восприимчивости для создания АНФК и возможности управления эффективными значениями коэффициентов нелинейной связи волн в них.
2. Впервые показана теоретическая возможность реализации невырожденного процесса параметрического усиления при низкочастотной накачке в АНФК и проведено его теоретическое исследование.
3. Установлена возможность эффективной генерации высших оптических гармоник в квадратично-нелинейных АНФК и формирование при их суперпозиции импульсов субфемтосекундной длительности.
4. Изучено влияние неточности создания нелинейной структуры нелинейно-оптических кристаллов на протекание трехчастотных и связанных многоволновых процессов.
5. Впервые теоретически исследованы последовательные процессы генерации третьей гармоники 3ω и частоты $(3/2)\omega$ в активных НФК в режиме модуляции добротности резонатора.
6. Теоретически изучен угловой спектр излучения второй гармоники, генерируемой фемтосекундными лазерными импульсами НФК LiNbO_3 в геометрии Лауэ, и проведено сравнение с результатами эксперимента.

4. Защищаемые положения

1. Аперiodическая нелинейная структура, конструируемая методом суперпозиции модуляции нелинейной восприимчивости, позволяет реализовать связанные многоволновые квазисинхронные нелинейно-оптические взаимодействия.
2. Метод суперпозиции модуляции нелинейной восприимчивости допускает управление эффективными коэффициентами нелинейной связи волн на этапе конструирования нелинейной структуры.
3. В аперiodических нелинейных фотонных кристаллах возможно осуществить невырожденный процесс параметрического усиления при низкочастотной накачке и эффективную генерацию высших оптических гармоник.
4. Нарушение условия квазисинхронизма в многоволновых взаимодействиях, обусловленное неточностью создания необходимой аперiodической структуры, при экспериментально достижимых

точностях (0.9 мкм) не меняет характер энергообмена между волнами.

5. Режим модуляции добротности в многоволновых последовательных процессах самопреобразования частоты при оптимальном подборе параметров резонатора, модулятора и накачки существенно увеличивает значения средних выходных мощностей волн на преобразованных частотах по сравнению со стационарным режимом генерации.

5. Практическая значимость

1. Применение многоволновых связанных взаимодействий позволяет решать задачу миниатюризации многочастотных нелинейно-оптических преобразователей.
2. Развитый метод суперпозиции модуляции нелинейной восприимчивости позволяет рассчитать параметры структуры АНФК для заданных длин взаимодействующих волн и необходимых эффективных значений коэффициентов нелинейной связи.
3. Развитый метод анализа влияния неточности создания нелинейной структуры АНФК на эффективность протекания связанных процессов позволяет задать необходимую точность изготовления аперийной структуры.
4. Исследованный процесс параметрического усиления при низкочастотной накачке может найти применение в квантовой оптике для получения перепутанных и кластерных квантовых состояний.
5. Результаты развитого подхода анализа многоволновых взаимодействий световых волн в АНФК могут представлять интерес для изучения генерации одновременно нескольких частот в ТГц-диапазоне электромагнитных волн, а также для изучения многоволновых взаимодействий волн другой физической природы.

6. Личный вклад

Автор вместе с научным руководителем принимал участие в постановке задач и обсуждении полученных результатов. Все изложенные в диссертации результаты получены автором лично или в соавторстве при его непосредственном участии.

7. Апробация работы

Результаты диссертационной работы опубликованы в журналах: Квантовая электроника, 2007, 2009; Письма в ЖЭТФ, 2007; ЖЭТФ, 2009; Оптика и спектроскопия, 2008; Physical Review A, 2008; Laser Physics. 2007; Journal of Russian Laser Research, 2005, 2008; Acta Physica Polonica A, 2007.

Докладывались на следующих конференциях: «Фундаментальные проблемы оптики-2006» (Санкт-Петербург, Россия, 2006); International

Conference on Coherent and Nonlinear Optics/ICONO (Минск, Беларусь, 2007); International School and Conference on Optic and Optic Materials/ISCOM (Белград, Сербия, 2007); устные выпуски журнала Journal of Russian Laser Research (Москва, Россия, 2008, 2009); Всероссийская научная школа-семинар «Волны-2008» (Московская область, Красновидово, Россия, 2008); «Фундаментальные проблемы оптики-2008» (Санкт-Петербург, Россия, 2008); International School and Conference on Photonics/PHOTONICA'09 (Белград, Сербия, 2009).

8. Структура и объем работы

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и списка цитируемой литературы. Полный объем работы: 151 страница, включая 57 рисунков, 3 таблицы. Библиография содержит 133 наименования, в том числе 10 авторских публикаций.

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении кратко обоснована актуальность выбранной темы, определены цели диссертационной работы, изложены основные защищаемые положения и охарактеризована ее структура и содержание.

В Главе 1 «Современные методы реализации многоволновых процессов в нелинейно-оптических кристаллах» приведен обзор литературы, касающейся изучаемых в диссертационной работе вопросов. Рассмотрены широко используемые методы создания кристаллов с пространственной модуляцией нелинейной восприимчивости, включая как методы создания периодической нелинейной структуры, так и методы, дающие возможность создания детерминированной аperiodической структуры. Дан обзор работ, посвященных исследованиям и разработке новых типов аperiodических структур для реализации многоволновых процессов и их экспериментальной реализации.

В Главе 2 «Неколлинеарные и последовательные коллинеарные взаимодействия в нелинейных фотонных кристаллах» сначала приведены результаты теоретического исследования процессов самопреобразования частоты лазерного излучения в активном НФК ниобата лития, легированного ионами Nd, в режиме модуляции добротности. Процессы, в которых одновременно в одном кристалле происходит лазерная генерация на частоте ω и нелинейное преобразование этой частоты, традиционно называются процессами самопреобразования. Детально рассмотрен процесс последовательного самоутроения

$$\omega + \omega = 2\omega, \quad 2\omega + \omega = 3\omega, \quad (1)$$

и генерации частоты $3/2\omega$:

$$\omega = \omega/2 + \omega/2, \quad \omega + \omega/2 = 3\omega/2. \quad (2)$$

Численно изучены временные и энергетические характеристики излучения, генерируемого в процессах последовательного самоутроения

и последовательного параметрического самопреобразования частоты вверх при их протекании в режиме модуляции добротности резонатора. Исследованы параметры импульсов излучения, генерируемых в рассматриваемых процессах внутри резонатора. Рассчитана выходная мощность излучения на преобразованных частотах и исследована ее зависимость от параметров накачки, резонатора и модулятора добротности. Показано существование оптимальных значений этих параметров, при которых мощность генерируемого излучения максимальна. Продемонстрировано, что в исследуемых процессах самопреобразования частоты средние выходные мощности излучения на преобразованных частотах в режиме модуляции добротности при оптимальном подборе параметров резонатора, модулятора и накачки могут существенно превышать значения соответствующих мощностей в стационарном режиме.

В этой же Главе развита теория ГВГ фемтосекундными лазерными импульсами в НФК ниобата лития в геометрии Лауэ. Традиционно в НФК взаимодействующие волны распространяются перпендикулярно доменным стенкам, при этом осуществляется коллинеарный квазисинхронизм. В схеме Лауэ вектор излучения накачки параллелен плоскостям доменных стенок.

Теоретически получены угловые распределения излучения ВГ для различных типов взаимодействия и оценена эффективность преобразования. Определены порядки квазисинхронизма и угловая расходимость излучения ВГ. Выполнена оценка эффективности взаимодействия. Проведенные исследования показали, что нестационарный характер нелинейного взаимодействия и ширина спектра основного излучения являются существенными факторами в реализации ГВГ в геометрии Лауэ. Показано, что на ширину углового спектра ВГ оказывает влияние изменение периода модуляции нелинейной восприимчивости, а для повышения эффективности преобразования следует осуществлять квазисинхронное взаимодействие на меньших порядках, что соответствует применению кристаллов с меньшим периодом. Результаты развитой теории совпадают с экспериментальными данными по фемтосекундной ГВГ в НФК LiNbO_3 в геометрии Лауэ.

В Главе 3 «Метод суперпозиции модуляции нелинейной восприимчивости» изложена суть развиваемого нового метода конструирования аperiodической нелинейной структуры. Как уже отмечалось, рассмотренные в Главе 2 последовательные процессы имеют ряд ограничений с точки зрения генерации возможных длин волн, участвующих во взаимодействии, и количества процессов. Разрабатываемый в диссертации метод создания аperiodической нелинейной структуры позволяет относительно просто осуществить несколько связанных трехчастотных процессов с произвольными длинами волн, лежащими в области прозрачности кристалла.

Действительно, в НФК с периодом Λ набор векторов обратной нелинейной решетки \mathbf{g} имеет компоненты с пространственной частотой

$K = 2\pi m/\Lambda$, которые компенсируют волновую расстройку Δk для нелинейно-оптического процесса на порядке квазисинхронизма m :

$$|g| = 2\pi m/\Lambda = \Delta k.$$

Обобщая это утверждение, можно сказать следующее: в кристалле с модуляцией нелинейной восприимчивости существует возможность реализации трехчастотного нелинейно-оптического взаимодействия, если в пространственном спектре нелинейной структуры присутствуют компоненты, которые равны модулю фазовой расстройки для данного процесса. При этом эффективный коэффициент нелинейной связи для него пропорционален величине соответствующего локального максимума (компоненты) пространственного спектра. Задача осуществления многоволновых процессов сводится, следовательно, к построению такой $g(z)$, в спектре которой будут максимумы для частотных компонент, соответствующих волновым расстройкам протекающих процессов.

Метод суперпозиции модуляции нелинейной восприимчивости позволяет сравнительно просто реализовать такую зависимость:

$$g(z) = \text{sign} \left[\sum_{j=1}^N a_j \sin \left(\frac{2\pi z}{\Lambda_j} + \varphi_j \right) \right], \quad (3)$$

где $\text{sign}(x)$ — знакопеременная функция $\text{sign}(x) = 1$ при $x > 0$, $\text{sign}(x) = -1$ при $x < 0$ и $\text{sign}(x) = 0$ при $x = 0$, a_j , φ_j — амплитуда и фаза модулирующей гармоника, N — число трехчастотных процессов, одновременно протекающих в кристалле, $\Lambda_j = 2\pi/|\Delta k_j|$ — период модуляции нелинейной структуры, необходимый для реализации j -го процесса с волновой расстройкой Δk_j .

Анализ (3) показал, что в спектре аperiodической функции $g(z)$ присутствуют компоненты вектора обратной решетки $2\pi/\Lambda_j$, которые компенсируют волновые расстройки для j -го процесса в первом порядке квазисинхронизма. Например, на рис. 1 приведен пространственный спектр функции (3) для случая связанного взаимодействия, состоящего из двух процессов ($N = 2$, $\Lambda_1 = 7$ мкм, $\Lambda_2 = 10$ мкм). Для $N = 1$ формула (3) описывает функцию модуляции знака нелинейной восприимчивости для НФК.

В Главе 3 подробно проанализировано влияние параметров нелинейной решетки на характер протекания процессов в АНФК.

Рассмотрен метод вторичного упрощения системы укороченных уравнений, описывающих пространственную динамику комплексных амплитуд взаимодействующих волн в АНФК. Он заключается в замене явно зависящего от z произведения функций вида $g(z)e^{\pm i\Delta k_j z}$ (см. ниже систему уравнений (6)) на его среднее значение g_j по длине L кристалла, в результате чего система уравнений сводится к системе с постоянными коэффициентами. При этом эффективный коэффициент нелинейной связи волн представляет произведение величины, определяемой нелинейными свойствами кристалла и геометрией

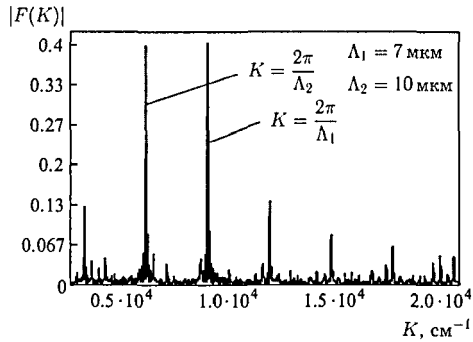


Рис. 1. Модуль пространственного фурье-спектра $|F(K)|$ функции $g(z)$, описывающей поведение знака нелинейной восприимчивости в АНФК для реализации двух трехчастотных нелинейно-оптических взаимодействий

взаимодействия, и величины, определяемой параметрами нелинейной структуры. Таким образом, метод суперпозиции модуляции нелинейной восприимчивости позволяет управлять нелинейными коэффициентами на этапе создания структуры за счет изменения параметров нелинейной решетки.

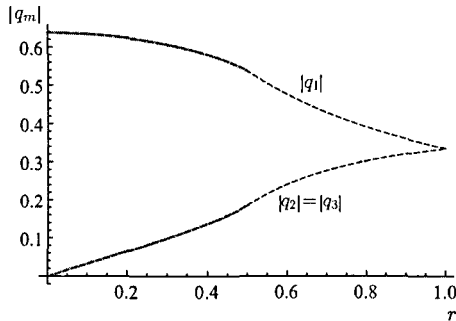


Рис. 2. Зависимость эффективных коэффициентов нелинейной связи $|g_m|$ от отношения пространственных амплитуд $r = a_{3,2}/a_1$ для случая трех связанных процессов ($m = 1, 2, 3$) в АНФК при $a_2 = a_3$

Особое внимание уделено анализу связи между пространственными амплитудами аperiodической решетки с эффективными коэффициентами нелинейной связи взаимодействующих волн. Найдены аналитические зависимости для эффективных коэффициентов нелинейной связи для случая двух и трех процессов, участвующих в связанном многоволновом взаимодействии. Применение полученных зависимостей открывает возможность решения обратной задачи поиска параметров аperiodической структуры по предварительно заданным эффективным коэффициентам связи волн, что представляет несомненный интерес для практической реализации подобных процессов. В качестве иллю-

страции на рис. 2 представлен результат расчета эффективных коэффициентов нелинейной связи в зависимости от параметров решетки в формуле (3) для трех процессов. Кроме этого, в Главе 3 рассмотрено влияние фаз пространственных гармоник нелинейной структуры на динамику протекания связанного процесса. Установлено, что изменение фаз эквивалентно изменению начальных фаз взаимодействующих волн.

Все расчеты в Главе 3 выполнены для хорошо известного одноосного нелинейно-оптического кристалла LiNbO_3 . Это обусловлено, в частности, тем, что данный кристалл является одним из наиболее часто используемых для создания неоднородной нелинейной структуры, для него разработаны эффективные технологии роста и создания пространственно-модулированной квадратичной восприимчивости.

Глава 4 «Многоволновые процессы в аперiodических нелинейных фотонных кристаллах» посвящена детальному теоретическому исследованию некоторых многоволновых процессов, которые можно реализовать в АНФК: параметрическое усиление при низкочастотной накачке, генерация высших гармоник и формирование субфемтосекундных импульсов на примере кристалла ниобата лития.

Показана принципиальная возможность осуществления процесса параметрического усиления при низкочастотной накачке. Этот процесс заключается в параметрическом усилении двух волн с частотами ω_1 и ω_2 в поле интенсивной волны накачки с частотой ω_p :

$$\omega_p = \omega_1 + \omega_2, \quad (4)$$

одновременно с которым в поле этой же волны накачки происходят трехчастотные взаимодействия вида

$$\omega_p + \omega_1 = \omega_3, \quad \omega_p + \omega_2 = \omega_4. \quad (5)$$

Система укороченных (упрощение производится методом медленно меняющихся амплитуд) уравнений для комплексных амплитуд волн A_j (j — индекс, соответствующий частоте ω_j), описывающая данный процесс, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} i \frac{dA_p}{dz} &= \gamma_p^{(1)} g(z) A_1 A_2 e^{-i\Delta_1 z} + \gamma_p^{(2)} g(z) A_3 A_1^* e^{i\Delta_2 z} + \gamma_p^{(3)} g(z) A_3 A_2^* e^{i\Delta_3 z}, \\ i \frac{dA_1}{dz} &= \gamma_1^{(1)} g(z) A_p A_2^* e^{i\Delta_1 z} + \gamma_1^{(2)} g(z) A_p^* A_3 e^{i\Delta_2 z}, \\ i \frac{dA_2}{dz} &= \gamma_2^{(1)} g(z) A_p A_1^* e^{i\Delta_1 z} + \gamma_2^{(3)} g(z) A_p^* A_4 e^{i\Delta_3 z}, \\ i \frac{dA_3}{dz} &= \gamma_3^{(2)} g(z) A_p A_1 e^{-i\Delta_2 z}, \\ i \frac{dA_4}{dz} &= \gamma_4^{(3)} g(z) A_p A_2 e^{-i\Delta_3 z}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $\gamma_i^{(j)}$ — эффективные нелинейные коэффициенты, определяемые нелинейными свойствами кристалла и геометрией взаимодействия,

$g(z)$ — функция модуляции нелинейной восприимчивости, конструируемая по формуле (3).

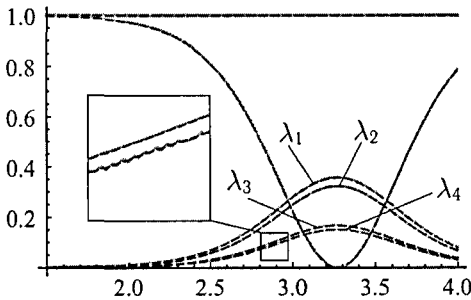


Рис. 3. Пространственная динамика интенсивностей взаимодействующих волн для процесса параметрического усиления при низкочастотной накачке

На рис. 3 изображены результаты решения системы (6) (сплошная серая линия) и вторично упрощенной системы (пунктирная линия).

После вторичного упрощения система (6) сводится к системе с постоянными коэффициентами вместо функций вида $\gamma_j^{(k)} g(z) e^{\pm i \Delta k_j z}$ и в некоторых случаях допускает аналитическое решение. В случае заданного поля ($A_p = \text{const}$), что соответствует

начальному этапу развития процесса, удастся рассчитать инкремент усиления взаимодействующих волн Γ ($A_j(z) \sim A_j^0 e^{\Gamma z}$). В общем случае значение Γ комплексно. Однако при определенном соотношении коэффициентов $|g_1|$, $|g_2|$ и $|g_3|$ значение Γ оказывается действительным. За счет возможности изменения g_m это условие может быть выполнено, и процесс параметрического усиления при низкочастотной накачке может быть реализован ($A_j \sim e^{\Gamma z}$). Для процесса параметрического усиления при низкочастотной накачке изучена динамика энергообмена между взаимодействующими волнами, рассчитаны перестроечные зависимости и полоса параметрического усиления как для случая эффективного энергообмена, так и в приближении заданного поля.

В работе также показано, что в АНФК можно добиться эффективного протекания процесса генерации высших оптических гармоник. На примере АНФК ниобата лития были рассчитаны нелинейные структуры для генерации восьми и шести оптических гармоник при накачке лазерным излучением с длиной волны 5 мкм (что соответствует СО-лазеру) и 2.7 мкм (в качестве источника можно использовать, например, химический НФ-лазер) соответственно. В таблице показаны длины волн гармоник (в мкм), генерация которых возможна в подобном АНФК.

| Вариант | Накачка | 2-я | 3-я | 4-я | 5-я | 6-я | 7-я | 8-я |
|---------|---------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| I | 5 | 2.5 | 1.667 | 1.25 | 1 | 0.833 | 0.714 | 0.625 |
| II | 2.7 | 1.35 | 0.9 | 0.675 | 0.54 | 0.45 | — | — |

Поскольку параметры решетки (амплитуды пространственных частот a_j в выражении (3)) определяют эффективные нелинейные коэф-

фициенты, пространственная динамика протекания процессов зависит от параметров решетки. Метод суперпозиции модуляции нелинейной восприимчивости допускает возможность создания нелинейной структуры для реализации различных процессов. Например, можно подобрать такие параметры решетки, при которых возможна эффективная генерация пятой или седьмой гармоники (теоретически — любой частоты, попадающей в область прозрачности кристалла). Рис. 4 соответствует случаю генерации седьмой гармоники. Отметим, что рассматриваемый процесс протекает в среде с квадратичной нелинейностью.

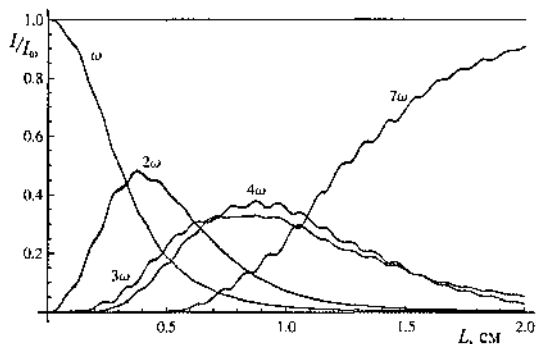


Рис. 4. Интенсивности I_j взаимодействующих волн в зависимости от длины в случае генерации седьмой гармоники. Значения пространственных амплитуд $a_1 = a_2 = a_3 = a_6 = 1$ и $a_4 = a_5 = a_7 = 0$ в АНФК ниобата лития при накачке с длиной волны 5 мкм

В настоящее время интенсивно исследуется возможность получения сверхкоротких лазерных импульсов длительностью 10^{-15} – 10^{-17} с. Генерация таких импульсов представляет интерес для различных областей науки и техники. Современные предложения по формированию сверхкоротких импульсов сводятся, в основном, к проблеме фазировки эквидистантных гармоник высокого порядка. Этот принцип идеологически близок принципу синхронизации мод, активно используемому в лазерных системах. При этом длительность импульса τ определяется шириной спектра, а частота их следования — частотой межмодовых биений.

При суперпозиции высших гармоник с эквидистантными частотами для формирования субфемтосекундных импульсов необходимо выполнение следующих двух условий:

1. Все волны должны иметь одинаковые амплитуды
2. Все волны должны иметь одинаковые фазы

В этом случае поле является суперпозицией нескольких волн на выходе кристалла и представляет собой аналог видеоимпульса в радиочастотном диапазоне. Это не импульс в обычном понимании, когда имеется высокая несущая частота. Для того, чтобы обеспечить выполнение первого условия для генерации субфемтосекундных импульсов,

можно воспользоваться свойством нелинейной структуры по контролю эффективных коэффициентов нелинейной связи. За счет изменения пространственных амплитуд a_j , как показали расчеты, можно создать такую нелинейную решетку, в которой на определенной длине кристалла все интенсивности взаимодействующих связанных волн будут приблизительно одной величины. Для выполнения второго условия генерации импульсов необходимо обеспечить равенство фаз этих волн. Это может быть достигнуто автоматически за счет дисперсионных характеристик нелинейного кристалла. В результате на выходе АНФК могут формироваться импульсы субфемтосекундной длительности. Для случая суперпозиции восьми и шести гармоник длительности импульсов оценены как $\tau \approx 850$ ас и 620 ас при периоде повторения ~ 14 фс и ~ 9 фс соответственно. Импульсы с такой частотой повторения могут представлять интерес для высокоскоростной оптической связи.

В Главе 5 «Случайное нарушение условия квазисинхронизма в связанных нелинейно-оптических процессах» разработан численный метод моделирования влияния неточности создания аperiodической нелинейной структуры на протекание нелинейно-оптических процессов. Он включает в себя следующие этапы:

1. Для функции $g(z)$, задаваемой уравнением (3), характеризующей зависимость знака нелинейной восприимчивости и соответствующей условию точного квазисинхронизма, производится поиск координат ее нулевых значений. Для алгоритма поиска при этом не имеет значения периодическая или аperiodическая функция $g(z)$, что делает разрабатываемый метод пригодным для любого типа структур.
2. Построение новой функции $g^{(r)}(z)$, которая отличается от «точной» функции $g(z)$. При этом координата расположения $z_j^{(r)}$ j -го нуля функции $g^{(r)}(z)$ является случайной гауссовской величиной со средним значением, равным значению координаты z_j нуля функции $g(z)$.
3. Численное решение системы укороченных уравнений, описывающих пространственную динамику амплитуд взаимодействующих волн для конкретной реализации $g^{(r)}(z)$.
4. Получение новой реализации функции $g^{(r)}(z)$, т. е. случайное изменение координат ее нулевых значений.

Далее повторение операций 2–4, накопление ансамбля реализаций, расчет средних значений и дисперсии флуктуаций интенсивностей взаимодействующих волн по этому ансамблю. Моделирование «реальной» функции $g^{(r)}(z)$ заключается во внесении случайной добавки δz_j к z_j :

$$g^{(r)}(z) = \text{sign} [(z - (z_0 + \delta z_0)) \cdot \dots \cdot (z - (z_n + \delta z_n))] = \\ = \text{sign} [(z - z_0^{(r)}) \cdot \dots \cdot (z - z_n^{(r)})], \quad (7)$$

В работе проведено сравнение данной методики с результатами аналитического стохастического подхода в приближении заданного поля на примере трехчастотного параметрического процесса $\omega_p = \omega_1 + \omega_2$, протекающего в НФК. На рис. 5 изображено сравнение результатов

аналитического и численного подхода, видно хорошее согласие результатов.

Далее разработанный численный алгоритм применялся для исследования более сложных многоволновых связанных процессов параметрического усиления при низкочастотной накачке и для процесса генерации высших оптических гармоник. Анализируется влияние флуктуаций ширины доменов АНФК на характер и эффективность протекания исследуемых процессов параметрического

усиления при низкочастотной накачке и на генерацию высших гармоник. Показано, что ошибки создания структуры отражаются на эффективности протекания процессов. Однако при небольших флуктуациях положения доменных стенок, сравнимых с экспериментально достижимыми, характер динамики практически не меняется, что является одним из достоинств метода суперпозиции модуляции нелинейной восприимчивости.

В Заключении перечислены основные результаты диссертационной работы.

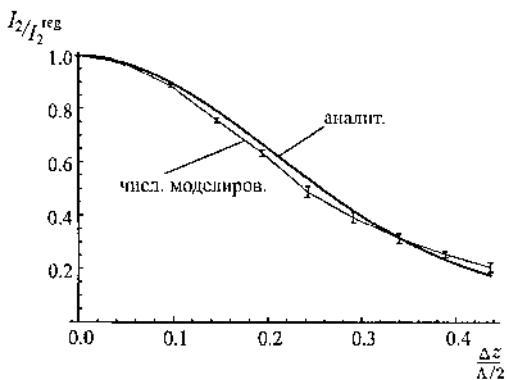


Рис. 5. Средняя интенсивность холостой волны при невырожденном трехчастотном параметрическом взаимодействии, нормированная на интенсивность, получаемой в идеальном периодическом НФК, в зависимости от $\Delta z/(\Lambda/2)$ (Δz — стандартное отклонение флуктуации положения доменных стенок)

Основные результаты

1. Разработан метод суперпозиции модуляции нелинейной восприимчивости для построения нелинейной аperiodической структуры. Кристаллы с такой нелинейной структурой допускают реализацию многоволновых квазисинхронных связанных процессов, состоящих из нескольких трехчастотных нелинейно-оптических взаимодействий. Этот метод снимает ограничения на длины взаимодействующих волн, накладываемые дисперсионными характеристиками кристаллов. Найдены аналитические выражения для эффективных коэффициентов нелинейной связи для случая двух и трех связанных процессов в АНФК, что дает возможность решения обратной задачи нахождения параметров аperiodической структуры по предварительно заданным эффективным коэффициентам связи волн.

2. Показана возможность вторичного упрощения системы уравнений, описывающей динамику комплексных амплитуд взаимодействующих волн с апериодически зависящими в пространстве коэффициентами нелинейной связи, к системе уравнений с постоянными коэффициентами. Полученная таким образом упрощенная система уравнений при некоторых условиях допускает аналитическое решение.
3. Продемонстрирована принципиальная возможность осуществления процесса невырожденного параметрического усиления при низкочастотной накачке в АНФК, полученных методом суперпозиции модуляции нелинейной восприимчивости.
4. Показано также, что в АНФК ниобата лития возможна генерация высших оптических гармоник и формирование последовательности импульсов длительностью ~ 600 ас и ~ 800 ас при накачке излучением с длиной волны 2,7 мкм и 5 мкм соответственно.
5. Исследовано влияние неточности создания пространственной нелинейной структуры на динамику протекания трехчастотных процессов, параметрического усиления при низкочастотной накачке и генерации высших гармоник. Разработанный метод позволяет оценить необходимую точность создания апериодической структуры. Показано, что при точности создания АНФК, сравнимой с экспериментально достижимой в настоящее время, характер пространственной динамики практически не меняется.
6. Изучены временные и энергетические характеристики излучения, генерируемого в процессах последовательного самоутроения и последовательной генерации частоты $(3/2)\omega$ при их протекании в режиме модуляции добротности резонатора. Показано существование оптимальных значений параметров резонатора накачки и модулятора, при которых мощности генерируемого излучения максимальны.
7. Теоретически проанализирован экспериментально реализованный процесс ГВГ от фемтосекундных импульсов в НФК ниобата лития в геометрии Лауэ. Установлено, что нестационарный характер нелинейного взаимодействия и ширина спектра основного излучения являются существенными факторами в реализации ГВГ в геометрии Лауэ.

Список публикаций по теме диссертации

Основные результаты диссертации отражены в следующих статьях:

1. *Чиркин А.С., Шутов И.В.* Параметрическое усиление световых волн при низкочастотной накачке в апериодических нелинейных фотонных кристаллах // ЖЭТФ, 2009, т. 136, вып. 4(10), с. 639–649.
2. *Шутов И.В., Чиркин А.С.* Моделирование случайного нарушения условия квазисинхронизма в оптическом параметрическом процессе // Квантовая электроника, 2009, т. 39, № 8, с. 691–784.

3. *Shutov I.V., Chirkin A.S.* Consecutive high-order harmonic generation and formation of subfemtosecond light pulses in aperiodical nonlinear photonic crystals // *Physical Review A*, 2008, v. 78, № 1, p. 013827-1–013827-5.
 4. *Шутов И.В., Ожередов И.А., Шумицкий А.В., Чиркин А.С.* Генерация второй гармоники в геометрии Лауэ фемтосекундными лазерными импульсами // *Оптика и спектроскопия*, 2008, т. 105, № 1, с. 89–94.
 5. *Chirkin A.S., Saigin M.Yu., Shutov I.V.* Parametric amplification at low frequency pumping and generation of four-mode entangled states // *Journal of Russian Laser Research*, 2008, v. 29, № 4, p. 336–346.
 6. *Шутов И.В., Новиков А.А., Чиркин А.С.* // Формирование субфемтосекундных лазерных импульсов в аperiodически поляризованных нелинейно-оптических кристаллах, *Квантовая электроника*, 2008, т. 38, № 3, с. 258–262.
 7. *Чиркин А.С., Шутов И.В.* О возможности невырожденного параметрического усиления оптических волн при низкочастотной накачке // *Письма в ЖЭТФ*, 2007, т. 86, вып. 11, с. 803–807.
 8. *Novikov A.A., Shutov I.V.* Consecutive Q-Switched Self-Frequency Conversion in Periodically Poled Active Nonlinear Crystals // *Laser Physics*, 2007, v. 17, № 1, p. 31–39.
 9. *Shutov I.V., Shumitsky A.V., Ozheredov I.A.* Three-Frequency Wave Interactions in the Field of 100 fs Ti:Sapphire Laser pulse in PPLN // *Acta Physica Polonica A*, 2007, v. 112, № 5, p. 915–920.
 10. *Novikov A.A., Shutov I.V.* Time and energy characteristics of radiation at Q-switched self-frequency conversion // *Journal of Russian Laser Research*, 2005, т. 26, № 4, с. 294–311.
- и докладывались на российских и международных конференциях:
1. Parametric amplification of light waves at low-frequency pumping in aperiodical nonlinear photonic crystals // II International School and Conference on Photonics PHOTONICA-09, Book of abstracts, p. 50 (2009), Serbia, Belgrade (Co-author Chirkin A.S.)
 2. Квазисинхронные многоволновые взаимодействия в аperiodических нелинейных фотонных кристаллах // устный выпуск журнала *Journal of Russian Laser Research*, 15.05.2009, ФИАН и МЛЦ МГУ, Москва. (Соавтор Чиркин А.С.)
 3. Связанные нелинейно-оптические взаимодействия световых волн в аperiodических нелинейных фотонных кристаллах // Сборник трудов конференции «Фундаментальные проблемы оптики-2008», Россия, Санкт-Петербург, 20–24 октября 2008 г, 2008. (Соавтор Чиркин А.С.)
 4. Параметрическое усиление в поле низкочастотной накачки при квазисинхронных связанных нелинейно-оптических взаимодействиях // Программа Всероссийской научной школы-семинара «Волны-2008», 26–30 мая 2008, с.10, 2008. (Соавторы Чиркин А.С., Сайгин М.Ю.)

5. Генерация высших оптических гармоник и формирование субфемтосекундных лазерных импульсов в аperiодическом нелинейном фотонном кристалле LiNbO_3 // Программа Всероссийской научной школы-семинара «Волны-2008», 26–30 мая 2008, с.10, 2008. (Соавтор Чиркин А.С.)
 6. Параметрическое усиление при низкочастотной накачке и генерация четырехчастотных перепутанных состояний // устный выпуск журнала *Journal of Russian Laser Research*, 21.02.2008, ФИАН, Москва. (Соавторы Чиркин А.С., Сайгин М.Ю)
 7. Intracavity self-frequency conversion in periodically poled active nonlinear Nd:Mg:LiNbO_3 crystal // *Technical Abstract Summaries of Photonics West – Lasers and Applications in Science and Technology (LASE 2006)*, 21–26 January 2006, San Jose, California, USA (2006). (Co-authors Novikov A.A., Laptev G.D.)
 8. Three-frequency wave interactions in the field of 100-fs Ti:sapphire laser pulse in PPLN // *International School and Conference on Optics and Optical Materials ISCOM-07, Abstracts of plenary and invited lectures and contributed papers*, p. 91 (2007), Serbia, Belgrade (Co-authors Ozheredov I.A., Shumitsky A.V.)
 9. Multi-wave coupled interactions in aperiodically poled nonlinear crystals // *ICONO-2007, Minsk Thesis of International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2007)*, p. 44 (2007), Belarus, Minsk; *Proceedings SPIE*, 6729, p. 67292W, 2007. (Co-authors Novikov A.A., Chirkin A.S.)
 10. Femtosecond frequency doubling in PPLN crystal in Laue scheme // *ICONO-2007, Minsk Thesis of International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2007)*, p. 44 (2007), Belarus, Minsk; *Proceedings SPIE*, 6729, p. 67292X, 2007. (Co-authors Enikeeva V.A., Ozheredov I.A., Shkurinov A.P., Shumitsky A.V., Yusupov D.B.)
 11. Intracavity self-frequency conversion in periodically poled active nonlinear Nd:Mg:LiNbO_3 crystal // *Proceeding SPIE*, 6101, p. 61010C, 2006, (Co-authors Novikov A.A., Laptev G.D.)
 12. Последовательные процессы самопреобразования частоты в режиме модуляции добротности резонатора // *Сборник трудов конференции «Фундаментальные проблемы оптики-2006»*, Россия, Санкт-Петербург, 16–20 октября 2006 г, с.153–154, 2006. (Соавтор Новиков А.А.)
 13. Quantum properties of radiation at self-frequency conversion in periodically poled active nonlinear crystals // *Program of 4th Russian-French Laser Symposium*, 21–23 September, Nice, France, RFLS 2005. (Co-authors Novikov A.A., Laptev G.D., Chirkin A.S.)
- Обсуждались на научных семинарах кафедры Общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ.

Заказ № 32-а/10/09 Подписано в печать 08.10.2009 Тираж 100 экз. Усл. п.л. 1



ООО "Цифровичок", тел. (495) 649-83-30; (495) 778-22-20
www.cfr.ru ; e-mail:info@cfr.ru