

Янчук Ольга Валерьевна

**ОТОБРАЖЕНИЕ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ОДНООСНЫХ КРИСТАЛЛОВ В АБЕРРАЦИОННЫХ
СТРУКТУРАХ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Работа выполнена в Иркутском государственном университете путей
сообщения
и Иркутском филиале Института лазерной физики СО РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор **А.И. Илларионов**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор **Е.А. Раджабов**

доктор физико-математических наук
профессор **А.В. Шишаев**

Ведущая организация: Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования «Дальневосточный
государственный университет»

Защита диссертации состоится 18 февраля 2009 г. в 13³⁰ часов на за-
седании диссертационного совета Д 212.074.04 при Иркутском государствен-
ном университете по адресу: 664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Иркутского
государственного университета.

Автореферат разослан «_____» января 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.074.04,
кандидат физико-математических наук,
доцент



Б.В. Мангазеев

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Использование конденсированных сред в квантовых вычислениях, диагностике быстрых процессов, нелинейной лазерной спектроскопии и других направлениях прикладной физики стимулирует поиск нелинейных сред с набором оптических свойств, отвечающих конкретной задаче. Это, в свою очередь, требует более быстрых методов комплексной оценки нелинейно-оптических свойств конденсированных сред. Сегодня существуют отдельные методики для определения коэффициента нелинейности [1-4], компонентов тензора нелинейной восприимчивости [1, 4], углов коллинеарных синхронизмов [4], показателей преломления [4-5]. Создание новых и усовершенствование существующих методик необходимо для ускорения процесса поиска эффективных нелинейных сред. Одними из перспективных направлений в исследовании вещества как материала для нелинейной оптики являются нелинейно-оптические методы. Постоянный интерес к исследованию процесса преобразования излучения по частоте в анизотропных средах и связи его параметров со структурой вещества обусловлен тем, что преобразованное излучение несет в себе большое количество информации о свойствах данного вещества.

Для комплексного исследования нелинейно-оптических свойств кристалла возможно использование излучения со сложным волновым фронтом. Это позволяет расширить объем информации о свойствах среды излучения на выходе из кристалла и механизмах взаимодействия световых волн в различных направлениях кристалла. В представленной работе рассматривается взаимодействие конденсированной среды и лазерного излучения со сложным волновым фронтом, обусловленным наличием аберраций фокусирующей оптики. В этом случае проявляются механизмы взаимодействия среды с излучением, не реализуемые в безаберрационном случае. Со стороны среды эти механизмы будут определяться видом тензора диэлектрической восприимчивости. В частности, в этом случае при нелинейном преобразовании излучения по частоте в различных нелинейных кристаллах вторая оптическая гармоника имеет собственные пространственно-угловые структуры [6-9], которые несут в себе информацию о нелинейно-оптических свойствах кристалла-преобразователя и аберрациях волнового фронта основного излучения, вносимых реальной фокусирующей оптикой.

Преобразование излучения по частоте в пучке сфокусированных лучей проводилось различными авторами. В работах Г.В. Кривошекова и В.И. Самарина [6] проведён теоретический анализ влияния первичных аберраций фокусирующей оптической системы на процессы возбуждения суммарных частот лазерного излучения. Было показано, что при генерации второй гармоники сфокусированным лазерным излучением изменение эффективности преобразования и искажение выходного сигнала вызывают сферическая аберрация, кома и астигматизм. Исследования влияния перечисленных видов аберраций фокусирующей системы на пространственно-угловую структуру второй гармоники проведены В.И. Строгановым и А.И. Илларионовым [7, 8]. В их работах исследованы угловые структуры второй гармоники

ки, разработана теория генерации второй гармоники при фокусировке излучения накачки, неисправленной от комы, сферической аберрации, астигматизма в кристаллах иодата, ниобата и формиата лития. В работе J Hou [9] было проведено теоретическое исследование генерации второй гармоники при оо-е взаимодействии световых волн в одноосных кристаллах при наличии фазовых аберраций в лазерном пучке.

В опубликованных работах не определялся вклад нелинейных характеристик кристаллов в аберрационные структуры (пространственно-угловую структуру и распределение интенсивности) второй оптической гармоники. Однако этот вопрос является актуальным не только для реализации возможности комплексной оценки нелинейно-оптических свойств кристаллов, но и для исследования механизмов взаимодействия конденсированной среды с лазерным излучением при одновременном выполнении условий фазового синхронизма в различных направлениях кристалла.

Целью работы является комплексное исследование взаимодействия нелинейно-оптических кристаллов точечных групп симметрии 6 , $4mm$, $3m$, $\bar{4}2m$ с лазерным излучением со сложным волновым фронтом и влияния (отображения) нелинейно-оптических свойств одноосных отрицательных кристаллов на параметры аберрационных структур второй оптической гармоники.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Методами численного моделирования исследована зависимость параметров пространственно-угловых структур второй оптической гармоники от нелинейно-оптических свойств кристаллов-преобразователей точечных групп симметрии 6 , $4mm$, $3m$, $\bar{4}2m$.
2. При фокусировке оптическими системами, неисправленными от сферической аберрации, комы, астигматизма или совместного влияния астигматизма и сферической аберрации, методами численного моделирования исследовано распространение гауссовых пучков в нелинейных кристаллах точечных групп симметрии 6 , $4mm$, $3m$, $\bar{4}2m$ и пространственное распределение интенсивности излучения на основной и удвоенной частотах в фокальном пятне.
3. Проведено экспериментальное исследование пространственно-угловых структур второй оптической гармоники, генерируемой в отрицательных одноосных кристаллах при наличии различных аберрационных искажений волнового фронта основного излучения YAG:Nd лазера ($\lambda=1,064$ мкм).
4. Разработана математическая модель для исследования эффективной нелинейности кристалла d_{eff} и «параметра качества» η кристаллов точечных групп симметрии 6 , $4mm$, $3m$, $\bar{4}2m$ для синхронных векторных взаимодействий световых волн. Рассчитаны вклады, даваемые различными компонентами тензора нелинейной восприимчивости кристаллов рас-

смаатриваемых групп симметрии в эффективную нелинейность при генерации второй гармоники излучением со сложным волновым фронтом.

5. Разработаны методики определения показателей преломления, угла коллинеарного синхронизма, компонент тензора нелинейной восприимчивости одноосных кристаллов точечных групп симметрии 6 , $4mm$, $3m$, $\bar{4}2m$, а также методика определения компонент лучевых aberrаций фокусирующих линз и соответствующих им коэффициентов Зейделя для инфракрасной области спектра по aberrационным структурам второй оптической гармоники.

Научная новизна. Впервые проведена взаимосвязь угловых размеров и формы aberrационных структур второй оптической гармоники, генерируемой в одноосных отрицательных кристаллах с нелинейно-оптическими свойствами (показателями преломления, углами коллинеарного синхронизма) кристалла-преобразователя. Показано, что величина угловых размеров пространственно-угловой структуры второй оптической гармоники при генерации излучением со сложным волновым фронтом для $oo-e$ взаимодействия световых волн в одноосном кристалле определяется значениями показателей преломления кристалла на основной и удвоенной частотах, их соотношениями между собой, углом коллинеарного синхронизма кристалла.

На основании разработанной математической модели впервые определены направления распространения световых волн в кристаллах точечных групп симметрии 6 , $4mm$, $3m$, $\bar{4}2m$, в которых происходят наиболее эффективные векторные взаимодействия световых волн при генерации второй оптической гармоники.

Положения, выносимые на защиту

1. При взаимодействии лазерного излучения, обладающего сферической, коматической aberrациями или совместно астигматизмом и сферической aberrацией, с отрицательными кристаллами точечных групп симметрии 6 , $4mm$, $3m$, $\bar{4}2m$ их нелинейно-оптические свойства отображаются в угловых структурах второй оптической гармоники на выходной грани кристалла в виде кривых, которые являются результатом коллинеарных и векторных взаимодействий световых волн при выполнении условий фазового синхронизма.
2. Пространственная плотность преобразования световых волн по частоте в отрицательных кристаллах точечных групп симметрии 6 , $4mm$, $3m$, $\bar{4}2m$ при выполнении условий векторного синхронизма зависит от величины анизотропии показателей преломления кристаллов для световых волн на основной и удвоенной частотах.
3. Пространственное распределение интенсивности второй оптической гармоники при генерации излучением с различными видами aberrаций в волновом фронте в отрицательных кристаллах точечных групп симметрии

6, 4mm, 3m, $\bar{4}2m$ при выполнении условий векторного синхронизма неоднородно и определяется типом симметрии кристалла.

Достоверность результатов диссертации обеспечивается корректностью постановки задач; тщательностью проработки методики проведения экспериментов; удовлетворительным соответствием результатов расчета с экспериментальными данными.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы для комплексного определения нелинейно-оптических свойств кристалла-преобразователя, что является актуальным для поиска новых нелинейных высокоэффективных сред. По пространственно-угловым структурам второй оптической гармоники предложен метод контроля aberrаций фокусирующих линз в ИК области спектра, для которой не существует эффективных методик.

Апробация работы. Научные результаты работы апробированы на следующих конференциях:

- IX Международной школе-семинаре по люминесценции и лазерной физике (Иркутск, 2004).

- Международной интернет-конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития» (Одесса, 2005);

- Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2006» (Санкт-Петербург, 2006);

- Международной конференции «Прикладная оптика – 2006» (Санкт-Петербург, 2006);

- X Международной школе-семинаре по люминесценции и лазерной физике (Иркутск, 2006);

- Байкальской школе фундаментальных исследований (Иркутск, 2007);

- Международной конференции молодых ученых «Оптика – 2007» (Санкт-Петербург, 2007);

- Международной конференции «Оптика лазеров» (Санкт-Петербург, 2008);

- Международной конференции «Оптика атмосферы и океана» (Красноярск, 2008);

- XI Международной школе-семинаре по люминесценции и лазерной физике (Иркутск, 2008);

- Международной конференции «Оптика кристаллов и наноструктур» (Хабаровск, 2008).

Работа по теме диссертации была выполнена при частичной поддержке грантом РФФИ (№ 03-02-17733) и поддержке грантом для молодых ученых ИрГУПС (№ ЕН-08-03).

Публикации. Результаты работы по теме диссертации опубликованы в 16 научных работах, из них 3 статьи – в реферируемых журналах и 13 работ – в прочих журналах, сборниках трудов всероссийских и международных научных конференций.

Личный вклад автора. Основные теоретические и экспериментальные исследования проведены в значительном объеме соискателем. Эксперименты выполнены в соавторстве с коллегами из Иркутского государственного университета путей сообщения и Иркутского филиала Института лазерной физики СО РАН.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 142 страницах, содержит введение, четыре оригинальные главы и заключение. Работа иллюстрирована 43 рисунками и содержит 5 таблиц. Список использованной литературы включает 81 наименование.

II. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выполненных исследований, сформулированы задачи работы и защищаемые положения, показана их научная новизна, дана краткая аннотация работы.

Первая глава посвящена исследованию отображения нелинейно-оптических свойств одноосного отрицательного кристалла в пространственно-угловой и энергетической структурах второй оптической гармоники, генерируемой излучением с волновым фронтом, искаженным сферической абберацией фокусирующей линзы.

При рассмотрении данного вопроса проведён литературный обзор научных работ, в котором освещаются особенности механизмов генерации второй оптической гармоники в нелинейных кристаллах излучением со сложным волновым фронтом.

На механизмы и эффективность преобразования излучения по частоте в нелинейных кристаллах влияют параметры основного излучения и нелинейно-оптические свойства кристалла-преобразователя. Поэтому при рассмотрении задачи, поставленной в данной главе, в первую очередь рассмотрены структура и пространственное распределение интенсивности основного излучения на передней грани нелинейного кристалла при фокусировке в кристалл лазерного излучения (гауссова пучка) линзой, неисправленной от сферической абберации.

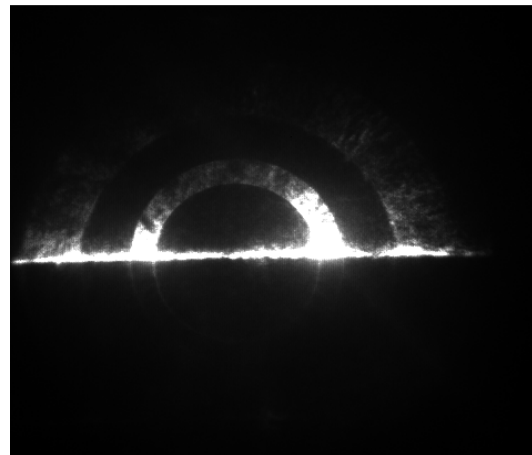
С применением дифракционного интеграла, который учитывает фазовую поправку на искажения волнового фронта основного излучения, вносимые абберациями фокусирующей линзы, геометрооптический подход к описанию распространения световых пучков и теорию первичных лучевых аббераций Зейделя, аналитически показано, что энергетическая структура сфокусированного излучения частоты ω перераспределяется и определяется выражением:

$$I^{\omega*}(x) = \frac{2}{\pi} \times \left| \int_0^1 J_0(L) \cdot \exp\left(-\frac{(a \cdot \rho)^2}{2\rho_0} - i\left(k(n-1)\frac{a \cdot \rho}{2d} + k\frac{x \cdot a \cdot \rho}{4}\right)\right) \cdot \rho \cdot d\rho \right|^2$$

где $L = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{R}\right) x \cdot \rho$, $J_0(L)$ – функция Бесселя нулевого порядка, x – расстояние от оси оптической системы на передней грани нелинейного кристалла, \vec{k} – волновой вектор основного излучения, n – показатель преломления материала линзы, d – радиус кривизны линзы, ρ_0 – радиус фокусируемого пучка, λ – длина волны основного излучения, ρ – поправка, отвечающая за размер кольцевых областей фокусирующей линзы ($0 \leq \rho \leq 1$), a – радиус линзы, R – фокусное расстояние оптической системы. На передней грани кристалла в фокусе линзы наблюдается не только картина Эйри, обусловленная дифракцией пучка на линзе, но и места с большей интенсивностью на периферийных участках фокального пятна по сравнению с интенсивностью поля в его других зонах (рис. 1, а). Образуется два места концентрации световых волн основного излучения на передней грани кристалла: в фокусе на оси оптической системы и в кольцевом фокусе.



а)



б)

Рис. 1. Угловая структура излучения, сфокусированного линзой неисправленного от сферической aberrации: а) частоты ω ($\lambda = 1,064$ мкм) на передней грани нелинейного кристалла; б) частоты 2ω ($\lambda = 0,532$ мкм) на выходе из кристалла ниобата лития

При взаимодействии одноосного отрицательного кристалла, вырезанного в направлении коллинеарного синхронизма, и лазерного излучения, волновой фронт которого искажен сферической aberrацией, в пространстве кристалла при выполнении условий фазового синхронизма реализуются два механизма генерации второй гармоники: *коллинеарные взаимодействия* (коллинеарный синхронизм) световых волн (взаимодействие кристалла со световыми волнами с коллинеарными волновыми векторами) и *векторные взаимодействия* (векторный синхронизм) световых волн (взаимодействие кристалла со световыми волнами с неколлинеарными волновыми векторами).

Первый механизм эффективной генерации второй гармоники в одноосных кристаллах можно реализовать только при взаимодействии световых

волн с кристаллом на поверхности конуса, образованного направлениями коллинеарного синхронизма кристалла. В этом случае на выходной грани кристалла высвечивается “дуга” второй оптической гармоники, являющаяся частью основания конуса коллинеарного синхронизма (рис. 1, б, нижняя кривая). Кривизна этой дуги обратно пропорциональна углу коллинеарного синхронизма кристалла, а её длина зависит от параметров излучения накачки и показателя преломления кристалла для волны обыкновенной поляризации на основной частоте. Таким образом, для различных одноосных кристаллов эта кривая в пространственно-угловой структуре второй гармоники будет иметь одинаковый вид, но различные угловые размеры, в которых отображаются такие нелинейно-оптические свойства кристаллов как угол коллинеарного синхронизма и показатель преломления кристалла для волны обыкновенной поляризации на частоте накачки.

Следующий механизм генерации второй гармоники – векторные взаимодействия при выполнении условий фазового синхронизма – в одноосных отрицательных кристаллах реализуется в части пространства кристалла, ограниченного внешними поверхностями конусов коллинеарного синхронизма

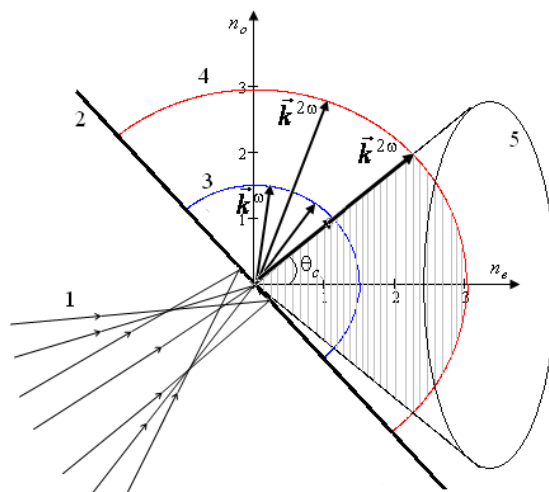


Рис. 2. Векторные взаимодействия световых волн в одноосном отрицательном кристалле, вырезанном в направлении коллинеарного синхронизма: 1 – излучение частоты ω , 2 – передняя грань нелинейного кристалла, 3 – эллипсоид показателей преломления кристалла для волн обыкновенной поляризации на частоте ω , 4 – эллипсоид удвоенных показателей преломления кристалла для волн необыкновенной поляризации на частоте 2ω

(рис. 2). В результате экспериментальных и теоретических исследований выявлено, что при выполнении условий векторного синхронизма углы $\theta_c^{6ЕК}$, под которыми кристалл генерирует вторую оптическую гармонику, имеют не только различные значения, определяющиеся из выражения:

$$\theta_c^{век} = \frac{\left(\frac{n_o^\omega}{n_e^{2\omega}} \cdot \cos \frac{\varphi_{вз}}{2} \right)^{-2} + 1}{\left(\frac{n_e^{2\omega}}{n_o^{2\omega}} \right)^2 - 1},$$

(n_o^ω , $n_o^{2\omega}$ – показатели преломления кристалла для волны обыкновенной поляризации соответственно на основной и удвоенной частотах, $n_e^{2\omega}$ – показатель преломления кристалла для волны необыкновенной поляризации удвоенной частоты, $\varphi_{вз}$ – угол взаимодействия между волнами основной частоты в кристалле), но и неодинаковую угловую ширину $\Delta\theta_c^{век}$ векторных взаимодействий световых волн в кристалле. Угловая ширина векторных взаимодействий световых волн в кристалле характеризует *пространственную плотность генерации второй оптической гармоники* при выполнении условий векторного синхронизма (чем больше угловая ширина векторного синхронизма, тем больше число реализаций эффективных векторных взаимодействий световых волн), которая при одинаковых параметрах излучения накачки определяется совокупностью следующих закономерностей: 1) чем меньше эксцентриситет эллипсоида показателей преломления кристалла для волны необыкновенной поляризации удвоенной частоты, тем больше угловая ширина векторного синхронизма кристалла; 2) чем меньше отношение показателей преломления кристалла $n_o^\omega/n_e^{2\omega}$, тем больше угловая ширина векторного синхронизма. В силу радиально симметричного распределения основного излучения на передней грани кристалла пространственно-угловая структура второй оптической гармоники, генерируемой кристаллом в результате векторных взаимодействий световых волн, представляет собой две дугообразные кривые (рис. 1, б, две верхние кривые). Для различных кристаллов эти кривые имеют одинаковый вид, но различаются угловыми размерами, в которых отображаются такие нелинейно-оптические свойства кристаллов, как показатели преломления кристалла для волн обыкновенной и необыкновенной поляризации на основной и удвоенной частотах.

Нелинейный отклик кристалла на поля световых волн, распространяющихся в различных направлениях пространства кристалла, определяется значением его эффективной нелинейности. В диссертационной работе получены математические выражения, определяющие значения эффективной нелинейности d_{eff} кристаллов точечных групп симметрии 6 , $4mm$, $3m$, $\bar{4}2m$ при генерации второй оптической гармоники для оо-е взаимодействия за счёт коллинеарных и векторных взаимодействий световых волн при выполнении условий коллинеарного и векторного синхронизма. Значение d_{eff} зависит от геометрии распространения световых волн относительно кристаллофизических осей кристалла и значений компонент тензора нелинейной восприимчивости. При моделировании энергетических распределений второй оптической гармоники на выходе из кристаллов иодата лития (точечная группа симметрии

б), ниобата лития (точечная группа симметрии $3m$), KDP (точечная группа симметрии $\bar{4}2m$) получены следующие результаты. Распределение интенсивности второй гармоники, генерируемой в кристаллах точечных групп симметрии 6 , $3m$, $\bar{4}2m$ при выполнении условий векторного синхронизма, неоднородно. Это обусловлено не только неоднородностью распределения интенсивности преобразуемого в кристалле излучения, но и величиной нелинейного отклика кристалла, который формируется различными вкладками компонент тензора нелинейной восприимчивости. В работе рассчитано, какой процентный вклад от своего значения вносит каждая компонента тензора нелинейной восприимчивости кристаллов точечных групп симметрии 6 , $4mm$, $3m$, $\bar{4}2m$ в его эффективную нелинейность для различных направлений в пространстве кристалла.

Во второй главе рассматривается влияние нелинейно-оптических свойств одноосных отрицательных кристаллов на пространственно-угловую и энергетическую структуры второй оптической гармоники при наличии коматической аберрации в основном излучении.

Теоретически показано, что искажения поля сфокусированного пучка при наличии коматической аберрации проявляются в существовании на передней грани нелинейного кристалла мест наибольшей интенсивности по сравнению с интенсивностью поля в других зонах фокального пятна. Это обусловлено фазовым аберрационным членом коматической аберрации, который определяет смещение фокусного максимума и возникновение дополнительных максимумов сравнимой интенсивности.

В кристалле возможны эффективные коллинеарные и векторные взаимодействия световых волн, в результате которых преобразованное излучение будет распространяться под углами $\alpha_i^{2\omega}$ к направлению коллинеарного синхронизма в кристалле, определяющимися из выражения:

$$\alpha_i^{2\omega} = \frac{\alpha_j + \alpha_k}{2}; \quad j \neq k,$$

где α_j , α_k – углы распространения взаимодействующих волн частоты ω относительно направления коллинеарного синхронизма. В результате реализации данных механизмов генерации второй гармоники на выходе из кристалла-преобразователя образуется пространственно-угловая структура второй гармоники, которую удобнее математически записывать в координатах:

$$\begin{cases} X = (\beta - \alpha^{2\omega}) \sin \zeta, \\ Y = (\beta - \alpha^{2\omega}) \cos \zeta \end{cases},$$

где β – угол наклона оси конуса лучей ω , выходящих из линзы, к оси оптической системы (β всегда отличен от нуля и определяется углом наклона излучения ω , падающего на линзу), ζ – угол между плоскостью коллинеарного синхронизма (плоскость синхронизма проходит через направление синхронизма θ_c и оптическую ось кристалла) и плоскостью отсчёта угла $\alpha_{2\omega}$, определяющийся из выражений:

$$\cos \zeta = \frac{-b + \sqrt{d}}{2a}, \quad \cos \zeta = \frac{-b - \sqrt{d}}{2a},$$

где

$$d = b^2 - 4 \cdot a \cdot c,$$

$$a = \sin^2 \theta_c \cdot \sin^2(\beta - \alpha^{2\omega}),$$

$$b = 2 \cdot \sin(\beta - \alpha^{2\omega}) \cdot \cos \alpha^{2\omega} (\sin \theta_c \cdot \cos(\theta_c + \beta) + \sin \beta \cdot \cos^2 \theta),$$

$$c = \cos^2 \alpha^{2\omega} \cdot \cos^2(\theta_c + \beta) - \cos^2 \theta \cdot \cos^2 \beta - 2 \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha^{2\omega} \cdot \sin(\beta - \alpha^{2\omega})$$

θ – угол между волновым вектором световой волны частоты 2ω и направлением коллинеарного синхронизма.

С помощью численного моделирования получены пространственно-угловые структуры второй гармоники для одноосных кристаллов различных сингоний (рис. 3). Эти структуры имеют различный вид и представляют собой три или четыре кривые, соответствующие коллинеарным и векторным взаимодействиям световых волн с кристаллом при выполнении условий фазового синхронизма в различных направлениях относительно его кристаллофизических осей. Угловые размеры и радиус кривизны кривой в структуре второй оптической гармоники, соответствующие коллинеарным взаимодействиям, коррелируют с углом коллинеарного синхронизма кристалла. Уменьшение или увеличение угловых размеров кривой коллинеарного синхронизма в структуре второй гармоники прямо пропорционально значению угла наклона β сфокусированного излучения относительно оптической оси системы.

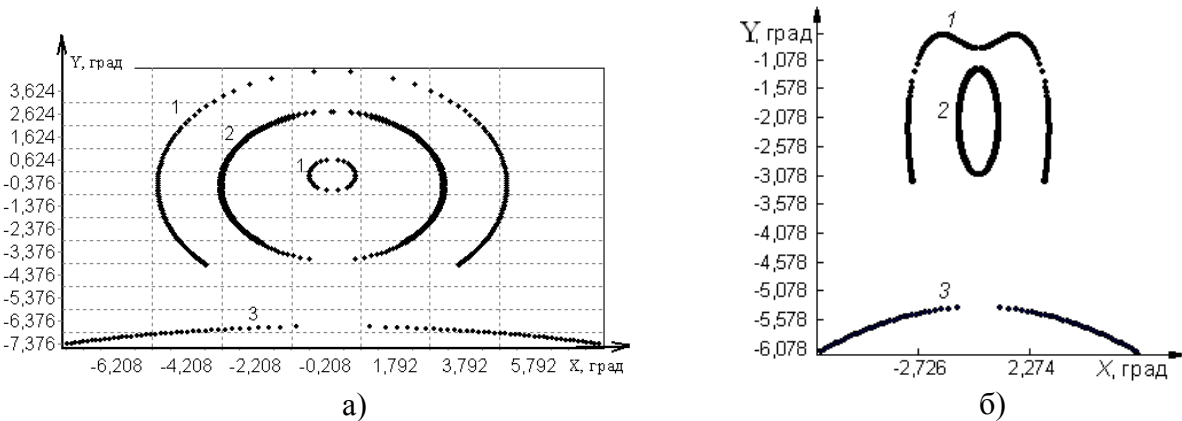


Рис. 3. Пространственно-угловые структуры второй оптической гармоники ($\lambda = 0,532$ мкм) при наличии коматической аберрации в основном излучении на выходе из кристаллов: а) RDP; б) иодата лития

При наличии комы в основном излучении концентрация лучей на передней грани кристалла, образующих кольцевой фокус, не радиально симметрична. В данном месте реализуется большее число углов взаимодействия между лучами основной частоты, чем в случае наличия в основном излучении сферической аберрации. Этим объясняется более сложная простран-

венно-угловая структура второй гармоники в случае наличия комы. Различия в видах пространственно-угловых структур второй гармоники для различных кристаллов связаны с возможностью реализации синхронных векторных взаимодействий. Определённому интервалу углов взаимодействия в кристалле между лучами основной частоты соответствует интервал углов векторного синхронизма, имеющий определённую (конкретную) ширину $\Delta\theta_c^{век}$ для различных кристаллов. Ширина интервала углов векторного синхронизма $\Delta\theta_c^{век}$ зависит от нелинейно-оптических свойств кристалла. При увеличении расстояния между фокусирующей линзой и нелинейным кристаллом возможность реализации векторных взаимодействий уменьшается. В этом случае пространственно-угловые структуры второй оптической гармоники для кристаллов, имеющих большой интервал углов векторного синхронизма, приобретают вид, схожий с видом пространственно-угловых структур второй оптической гармоники для кристаллов, которые обладают более узким интервалом углов векторного синхронизма. И, наоборот, при перемещении кристалла между краевыми фокусами линзы возможность различных углов взаимодействия между волнами накачки увеличивается. Пространственно-угловые структуры для кристаллов, имеющих узкий интервал углов векторного синхронизма, повторяют вид пространственно-угловых структур второй оптической гармоники для кристаллов с большим угловым интервалом углов векторного взаимодействия.

Распределение интенсивности в пространственно-угловых структурах второй оптической гармоники при генерации в кристаллах рассматриваемых групп симметрии излучением искажённым комой, как и в случае сферической aberrации, неоднородно (рис. 4).

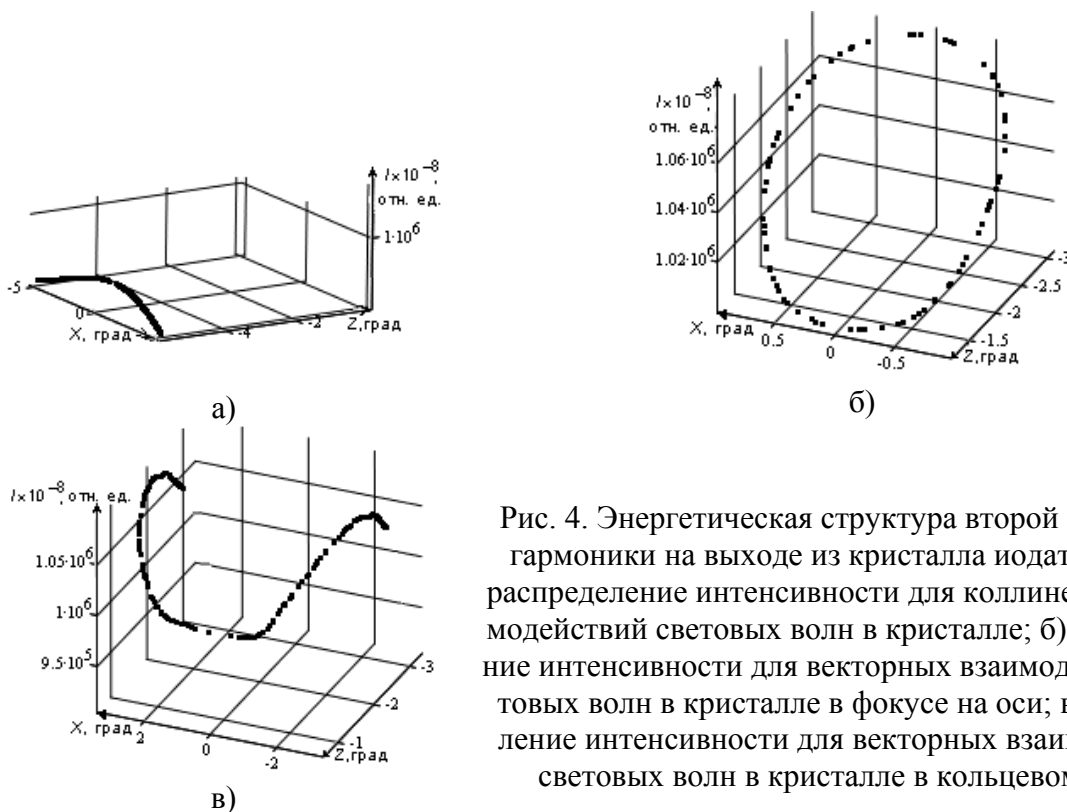


Рис. 4. Энергетическая структура второй оптической гармоники на выходе из кристалла иодата лития: а) распределение интенсивности для коллинеарных взаимодействий световых волн в кристалле; б) распределение интенсивности для векторных взаимодействий световых волн в кристалле в фокусе на оси; в) распределение интенсивности для векторных взаимодействий световых волн в кристалле в кольцевом фокусе

Это объясняется не только различием интенсивности взаимодействующих волн основной частоты, но и различными значениями эффективной нелинейности в зависимости от геометрии распространения взаимодействующих волн в одноосном кристалле.

В данной главе рассчитан «параметр качества» кристалла

$$\eta = \frac{d_{eff}^2}{(n_o^\omega)^2 \cdot n_e^{2\omega}(\theta_k)},$$

характеризующий эффективность преобразования излучения во вторую оптическую гармонику, во всех возможных направлениях, в которых кристалл может генерировать вторую оптическую гармонику в случае его взаимодействия со световыми волнами основного излучения при выполнении условий векторного синхронизма (рис. 5). Преобразования световых волн во вторую оптическую гармонику при выполнении условий векторного синхронизма в рассматриваемых кристаллах имеют близкие значения эффективности, иногда превышающие значения эффективности взаимодействия кристалла и коллинеарных световых волн. Используя данные распределения можно определить оптимальные направления распространения неколлинеарных световых волн, при взаимодействии с которыми нелинейный кристалл рассматриваемых групп симметрии генерирует наиболее эффективно вторую оптическую гармонику.

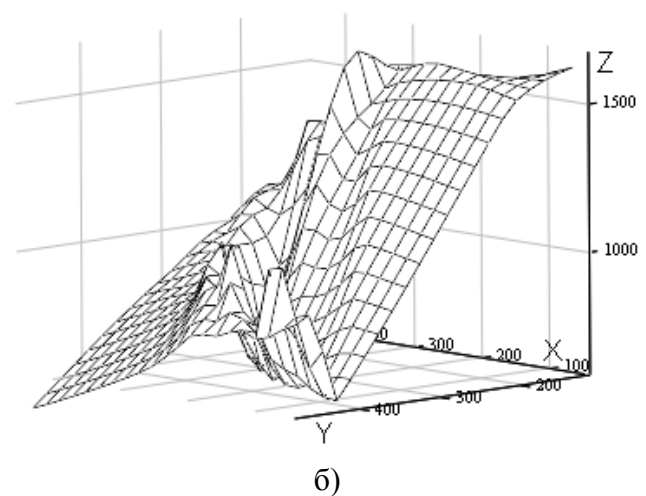
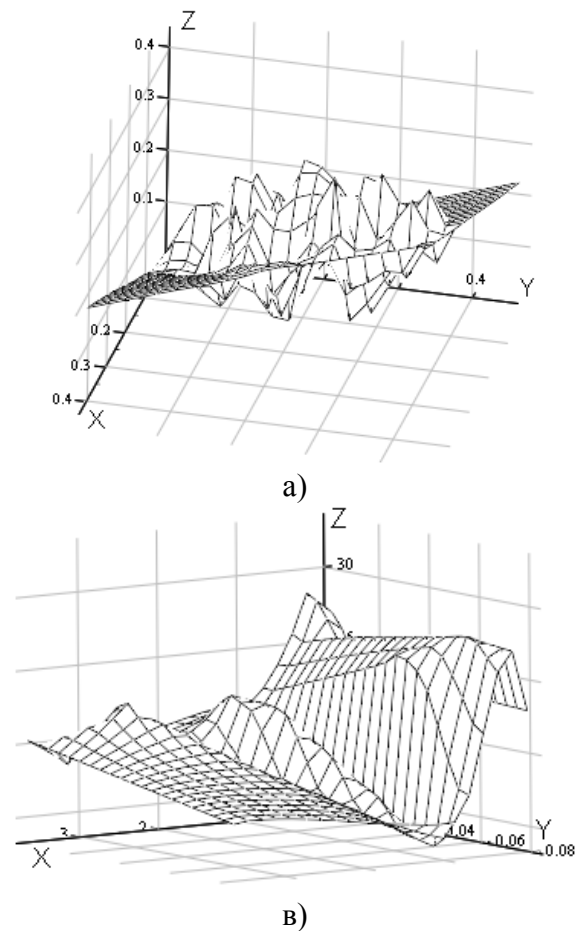


Рис.5. Параметр качества генерации второй оптической гармоники при выполнении условий векторного синхронизма в зависимости от направления распространения волн удвоенной частоты относительно кристаллофизических осей кристаллов: а) KDP, б) ниобата лития, в) иодата лития.

$$X = \eta \cos \alpha, \quad Y = \eta \cos \beta, \quad Z = \eta \cos \gamma.$$

Углы α , β , γ определяют направление волнового вектора второй оптической гармоники относительно кристаллофизических осей кристалла X, Y, Z

В третьей главе рассматривается отображение нелинейно-оптических свойств одноосных отрицательных кристаллов в структурах второй оптической гармоники при использовании цилиндрической линзы в оптической системе накачки.

В главе рассмотрены две схемы цилиндрической фокусировки основного излучения в нелинейный кристалл, вырезанный в направлении коллинеарного синхронизма: 1) фокусировка параллельного пучка лучей положительной цилиндрической линзой; 2) фокусировка параллельного пучка лучей системой линз, состоящей из положительной радиально симметричной и отрицательной цилиндрической линз.

В первом случае волновой фронт сфокусированного излучения имеет радиус кривизны R_f , соответствующий тангенциальной фокальной плоскости. Если распределение интенсивности фокусируемого пучка в фокальной плоскости волнового фронта равномерное и фокусировка производится всей поверхностью линзы, то в тангенциальной фокальной плоскости наблюдается яркая щелевидная линия равномерной интенсивности (рис. 6, а).

На расстояниях $0 \leq S < R_f$ от линзы до передней грани нелинейного кристалла, вырезанного в направлении коллинеарного синхронизма, векторные взаимодействия световых волн в кристалле невозможны. Последние появляются при $S = R_f$ в плоскостях, параллельных плоскости синхронизма, по всей длине сфокусированного щелевидного пучка. Интенсивность преобразованного в кристалле излучения по частоте зависит от интенсивности взаимодействующих в кристалле волн основной частоты и «параметра качества» η кристалла в направлении взаимодействия. «Параметр качества» η кристалла определяется значениями эффективной нелинейности, показателей преломления на основной и удвоенных частотах в определенном направлении кристалла относительно его кристаллофизических осей.

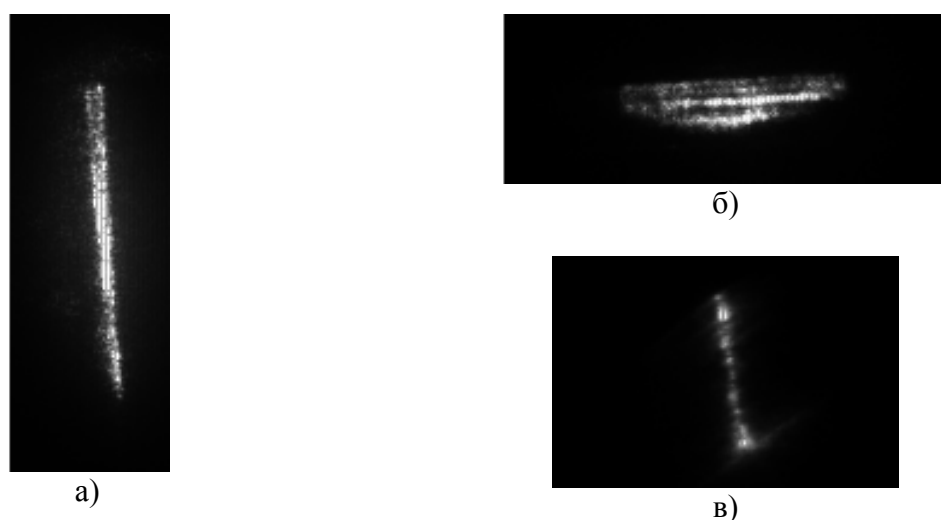


Рис. 6. Пространственно-угловая структура: а) основного излучения ($\lambda=1,064$ мкм) в фокальной плоскости цилиндрической линзы; б) излучения второй оптической гармоники ($\lambda=0,532$ мкм) на выходе из кристалла ниобата лития; в) излучения второй оптической гармоники ($\lambda=0,532$ мкм) на выходе из кристалла иодата лития

На выходе из нелинейного кристалла вид структуры второй гармоники рассчитывается в декартовых координатах:

$$\begin{aligned} X_1 &= l \cdot \operatorname{tg} \alpha^{2\omega} \\ Y_1 &= Y \end{aligned}$$

где l – толщина нелинейного кристалла, Y – координата точки фокусировки лучей основной частоты в плоскости XU передней грани нелинейного кристалла. В результате компьютерного моделирования выявлено, что в кристалле ниобата лития векторные преобразования волн по частоте происходят более эффективно. Эффективные взаимодействия неколлинеарных световых волн с кристаллом ниобата лития, вырезанного в направлении 90-градусного синхронизма, возможны по всему объему кристалла, а с кристаллами иодата лития и KDP эти взаимодействия ограничиваются направлением коллинеарного синхронизма. При фокусировке в нелинейный кристалл основного излучения цилиндрической линзой генерация второй гармоники происходит в определённой плоскости кристалла. Данное обстоятельство позволяет управлять степенью вклада определённых компонент тензора нелинейной восприимчивости кристалла в эффективную нелинейность d_{eff} , что может быть использовано для нахождения численных значений компонент тензора нелинейной восприимчивости кристалла.

В результате проведения экспериментальных исследований процессов генерации второй гармоники плоским пучком, сфокусированным цилиндрической линзой, установлено, что угловая структура излучения второй оптической гармоники на выходной грани кристалла представляет собой набор прямых линий, параллельных сагиттальной плоскости (рис. 5, б, в). Длина этих линий определяется углами $\alpha_i^{2\omega}$ распространения излучения удвоенной частоты, полученного за счёт векторных взаимодействий световых волн в кристалле. Из приведённых экспериментальных данных видно, что длина данных линий больше у кристалла ниобата лития, так как углы векторного синхронизма в данном нелинейном кристалле имеют большее числовое значение и больший интервал $\Delta\theta_c^{\text{век}}$ по сравнению с соответствующими углами и угловым интервалом кристалла иодата лития.

В оптической схеме, содержащей отрицательную цилиндрическую и положительную радиально симметричную линзы, достигается оптимальное с точки зрения эффективности преобразования соотношение между плотностью мощности излучения и его расходимостью [10]. В этом случае основное излучение будет иметь более сложный волновой фронт, чем в случае наличия в основном излучении сферической или коматической аберраций, что позволяет более информативно исследовать нелинейно-оптические свойства кристалла.

При экспериментальном исследовании параметров пространственно-угловых структур второй гармоники при генерации в кристаллах иодата и ниобата лития излучением, волновой фронт которой искажён совместно сферической аберрацией и астигматизмом, получены следующие результаты. Не-

линейно-оптические свойства одноосных отрицательных кристаллов отображаются в виде сложных структур второй оптической гармоники, являющихся результатом взаимодействия кристалла со световыми волнами при выполнении условий коллинеарного и векторного синхронизма. В этом случае реализуется большее количество возможных синхронных векторных взаимодействий световых волн в кристалле, что может быть полезно для анализа вклада компонент тензора нелинейности кристалла, участвующих в процессах преобразования. В меридиональной фокальной плоскости оптической системы накачки структуры излучения второй гармоники для кристаллов иодата и ниобата лития похожи, но угловые размеры структуры для кристалла ниобата лития больше, что объясняется большими значениями показателей преломления и угла коллинеарного синхронизма.

В четвёртой главе представлены методики определения некоторых нелинейно-оптических характеристик кристаллов по абберационным структурам второй оптической гармоники.

В начале главы приведён обзор существующих методов определения показателей преломления, углов коллинеарного и векторного синхронизмов, эффективной нелинейности, а также компонент тензора нелинейной восприимчивости кристаллов.

В диссертационной работе представлена разработанная методика определения углов коллинеарного синхронизма в одноосных нелинейных кристаллах по пространственно-угловой структуре второй гармоники, генерируемой излучением с волновым фронтом, искаженным абберациями фокусирующей линзы. По угловым размерам кривой в структуре второй гармоники, соответствующей синхронным взаимодействиям коллинеарных световых волн с кристаллом, можно определить угол коллинеарного синхронизма одноосного кристалла. Данный параметр одноосного кристалла также можно примерно оценить при появлении характерных структур второй гармоники, которые проявляются при направлении излучения со сложным волновым фронтом в кристалл вблизи направления коллинеарного синхронизма. Точность определения углов коллинеарного синхронизма в предложенном методе зависит от толщины кристалла (чем меньше толщина кристалла, тем точнее измерение), качества обработки поверхности материала, а также точности измерения угловых размеров пространственно-угловой структуры второй гармоники. Если исследуемый кристалл имеет направление 90-градусного синхронизма, то данная кривая в структуре второй гармоники при влиянии сферической абберации имеет вид прямой линии. По данной особенности возможна визуальная оценка существования 90-градусного синхронизма в кристалле.

В работе предложен нелинейно-оптический метод определения показателей преломления кристалла на основной и удвоенной частотах по угловым размерам пространственно-угловых структур второй оптической гармоники, генерируемой излучением со сложным волновым фронтом. Для определения показателей преломления кристаллов необходимо использовать две абберационные структуры второй гармоники: при наличии комы и сферической

абберации в основном излучении. Точность измерения показателей преломления этим методом также зависит от качества обработки поверхности кристалла, точности измерительных приборов и толщины исследуемого кристалла.

В диссертации представлен разработанный полуэмпирический метод определения компонент тензора эффективной нелинейности по энергетическому распределению второй оптической гармоники на выходе из кристаллов точечных групп симметрий 6 , $3m$, $\bar{4}2m$, $4mm$. При фотометрировании пространственно-угловой структуры второй оптической гармоники по разработанной методике можно определить компоненты тензора нелинейной восприимчивости исследуемого кристалла. Для этого необходимо определить значения интенсивности для точек кривых абберационных структур второй гармоники на выходе из нелинейного кристалла (число точек равно количеству независимых компонент тензора нелинейной восприимчивости), соответствующих преобразованиям излучения во вторую оптическую гармонику за счёт векторных взаимодействий световых волн с кристаллом, и полярные координаты местоположения этих точек относительно оптической оси системы на выходной грани кристалла.

На основании теоретических расчётов и экспериментальных исследований зависимости параметров абберационной структуры второй гармоники от оптических свойств кристалла-преобразователя получено, что эффективные векторные взаимодействия световых волн с кристаллической структурой несут в себе информацию не только о кристаллической среде преобразования, но и об абберациях фокусирующей оптики. В работе предложен нелинейно-оптический метод определения лучевых сферических аббераций фокусирующих линз в ИК области спектра, который основан на определённой обработке структуры второй гармоники, сформированной в плоскости выходной грани кристалла.

Заключение

На основании проведённых исследований механизмов взаимодействия одноосных отрицательных кристаллов точечных групп симметрий 6 , $4mm$, $3m$, $\bar{4}2m$ с лазерным излучением со сложным волновым фронтом при генерации второй оптической гармоники со сложным волновым фронтом и закономерности отображения нелинейно-оптических свойств среды преобразования в абберационных структурах второй оптической гармоники получены следующие результаты:

1. При генерации второй оптической гармоники в одноосных отрицательных кристаллах точечных групп симметрии 6 , $4mm$, $3m$, $\bar{4}2m$ излучением искажённым сферической, коматической абберациями, а также совместно сферической абберацией и астигматизмом в пространстве кристалла возможна одновременная реализация двух эффективных механизмов генерации второй гармоники: векторные и коллинеарные взаимодействия световых волн с кристаллом.

2. На основании экспериментальных исследований и компьютерного моделирования установлено, что угловая структура второй оптической гармоники представляет собой несколько кривых, угловые размеры которых отображают показатели преломления кристалла на основной и удвоенных частотах, а также угол коллинеарного синхронизма кристалла для рассматриваемого типа преобразования.
3. Выявлено, что пространственная плотность преобразования излучения по частоте при выполнении условий векторного синхронизма при одинаковых условиях фокусировки основного излучения в кристалл определяется анизотропией показателей преломления соответствующего одноосного отрицательного кристалла на основной и удвоенной частотах.
4. При использовании фокусировки основного излучения в нелинейный кристалл цилиндрической линзой пространственно-угловая структура второй гармоники представляет собой плоские фигуры. В угловых размерах данных фигур отображаются значения показателей преломления кристалла на основной и удвоенных частотах для световых волн обыкновенной и необыкновенной поляризации.
5. Разработана математическая модель, описывающая механизм формирования эффективной нелинейности и «параметра качества» кристаллов точечных групп симметрии $6, 4mm, 3m, \bar{4}2m$ для случая генерации второй гармоники излучением со сложным волновым фронтом при выполнении условий коллинеарного и векторного синхронизмов. В результате экспериментальных исследований и компьютерного моделирования установлено, что распределение интенсивности излучения в абберационных структурах второй оптической гармоники при наличии в основном излучении различных видов aberrаций неоднородно. Неоднородность данного распределения определяется не только неоднородностью распределения интенсивности в основном излучении, но и различным вкладом компонент тензора нелинейной восприимчивости кристалла в его эффективную нелинейность в различных направлениях пространства кристалла.
6. На основании проведённых экспериментальных и теоретических исследований разработаны методики определения углов коллинеарного синхронизма, показателей преломления, компонент тензора нелинейной восприимчивости одноосного нелинейного кристалла по aberrационным структурам второй оптической гармоники и нелинейно-оптический метод определения лучевых aberrаций линз в ИК области спектра по пространственно-угловым aberrационным структурам второй оптической гармоники.

Цитируемая литература:

1. Поливанов, Ю.Н. Комбинационное рассеяние света на поляритонах / Ю.Н. Поливанов // УФН. – 1978. – Т. 126, № 2. – С. 185-232.

2. Диесперов, К.В. Вычисление коэффициента эффективной нелинейности при генерации суммарной частоты для коллинеарного синхронизма с учётом двулучепреломления в двуосных кристаллах / К.В.Диесперов, В.Г. Дмитриев // Квант. Электрон. – 1997. – Т. 24, № 5. – С. 455-448.
3. Иванов, В.А. Влияние структурных и симметричных особенностей кристаллов стронция-бария с различным соотношением долей Sr и Ba в структуре на интенсивность возбуждаемой в них второй гармоники / В.А. Иванов, В.А. Бурдов, Н.Ю. Иванов, М.О. Марычев, Т.Н. Титаев, М.А. Фадеев, Е.В. Чупрунов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2007. – № 2. – С. 49-53.
4. Коренева, Л.Г. Нелинейная оптика молекулярных кристаллов / Л.Г. Коренева, В.Ф. Золин, Б.Л. Давыдов. – М. : Наука, 1985. – 200 с.
5. Агеев, Л.А. Определение показателя преломления диэлектриков с помощью светоиндуцированных дифракционных решеток / Л.А. Агеев, В.К. Милославский, О.В. Тютюнник и др. // Журнал прикладной спектроскопии. – 2001. – Т. 68, № 2. – С. 270-275.
6. Кривошеков, Г.В., Влияние aberrаций формирующей оптической системы на нелинейное преобразование лазерного излучения / Г.В. Кривошеков, В.И. Самарин // Опт. и спектр. – 1980. – Т. 48, № 5. – С. 963-967.
7. Stroganov, V.I. Optical system aberration effect in the second harmonic generation / V.I. Stroganov, A.I. Illarionov // Opt. Com. – 1980. – Vol. 35, № 3. – P. 455-461.
8. Строганов, В.И. Абберационная структура второй гармоники / В.И. Строганов, А.И. Илларионов // Журнал прикладной спектроскопии. – 1981. – Т. 34 – С. 233-237.
9. Hou, J Second-harmonic generation of phase aberrated laser beams by type I phase matching in uniaxial crystals / J. Hou, Y. Zhang, W. Jiang, et al. // Guangxue xuebao = Acta opt. sin.. – 1998. – Vol. 22, № 1. – С. 238-242.
10. Дмитриев, В.Г. Прикладная нелинейная оптика / В.Г. Дмитриев, Л.В. Тарасов. – М. : Физматлит. – 2004. – 512 с.

Публикации по теме диссертации:

1. Illarionov, A. I. Energy Distribution of the Basic Radiation and the Second Optical Harmonic at Presence Comatical Aberration / A. I. Illarionov, O.V. Yanchuk // Известия ВУЗов. Физика. – 2008. – Т. 51, № 10/2. – С. 174-178.
2. Илларионов, А.И. Влияние астигматизма волнового фронта основного излучения на нелинейное преобразование второй оптической гармоники / А.И. Илларионов, О.В. Янчук, А.А. Старченко // Известия ВУЗов. Физика. – 2008. – Т. 51, № 11. – С. 71-74.
3. Илларионов, А.И. Эффективность преобразования оптического излучения по частоте в одноосных кристаллах при фокусировке радиально симметричной линзой/А.И. Илларионов, О.В. Янчук // Оптика кристаллов и наноструктур : сб. науч. тр. междунар. конф. Хабаровск,

- 15-25 нояб. 2008 г.– Хабаровск : Изд-во Дальневост. ун-та путей со-
общ., 2008. – С. 159-163.
4. Илларионов, А.И. Влияние симметрии одноосных кристаллов на про-
странственное распределение интенсивности второй гармоники / А.И.
Илларионов, О.В. Янчук // Тез. лекций и докл. XI междунар. шк.-
семинара по люмен. и лазер. физике. Иркутск, 2-6 окт. 2008 г. – Ир-
кутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2008. – С. 45.
 5. Илларионов, А.И. Нелинейно-оптический метод определения луче-
вых aberrаций фокусирующей линзы в ИК области спектра [Элет-
кронный ресурс] / А.И. Илларионов, О.В. Янчук, А.А. Старченко //
Оптика атмосферы и океана-2008 : тез. докл. междунар. конф. Крас-
ноярск, 23-27 июня 2008 г. – Режим доступа:
<http://symp.iao.ru/ru/aoo/15/posters?sect=25>
 6. Илларионов, А.И. Нелинейное преобразование излучения по частоте
сфокусированного гауссова пучка / А.И. Илларионов, О.В. Янчук //
Известия ВУЗов. Физика. – 2007. – Т. 50, № 12. – С. 14-19.
 7. Янчук, О.В. Определение нелинейных свойств кристалла по aberrа-
ционной структуре второй гармоники / О.В. Янчук // Тез. докл. X ме-
ждунар. байкал. мол. шк. по фундамент. физике. Иркутск, 17-23 сент.
2007 г. – Иркутск : Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2007. – С. 92-93.
 8. Илларионов, А.И. Влияние первичной комы на распределение интен-
сивности гауссова пучка на основной и удвоенных частотах /
А.И. Илларионов, О.В. Янчук // Люминесценция и лазерная физика :
X междунар. шк.-семинар (Россия, Иркутск, 2–6 окт. 2006 г.) : мате-
риалы. – Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2007. – С. 160-168.
 9. Илларионов, А.И. Энергетическое распределение второй оптической
гармоники с учётом сферической aberrации / А.И. Илларионов, О.В.
Янчук // Фундаментальные проблемы оптики-2006 : сб. науч. тр. по
материалам междунар. конф. Санкт-Петербург, 16-20 октября 2006 г.
– СПб. : Изд. дом «Согвус», 2006 – С. 157-158.
 10. Илларионов, А.И. Программный расчёт aberrационной угловой
структуры второй оптической гармоники / А.И. Илларионов, О.В. Ян-
чук // Прикладная оптика-2006 : сб. науч. тр. по материалам между-
нар. конф. Санкт-Петербург, 16-20 октября 2006 г. – СПб. : Изд. дом
«Согвус», 2006 – С. 64-67.
 11. Илларионов, А.И. Автоматизация расчёта структуры второй гармоник
преобразованного в нелинейном кристалле при его накачки реаль-
ной оптической системой / А.И. Илларионов, О.В. Янчук // Информа-
ционные технологии и проблемы математического моделирования
сложных систем. Принципы математического моделирования техни-
ческих, социальных и энергетических систем : сб. науч. тр. – Иркутск :
ИрГУПС, 2006. – Вып. 3. – С. 52-60.
 12. Илларионов, А.И. Информатизация расчёта основных параметров
преобразования широкополосного ИК излучения в нелинейных кри-
сталлах / А.И. Илларионов, О.В. Янчук // Информационные техноло-

13. Илларионов, А.И. Энергетическое распределение основного излучения и второй оптической гармоники при наличии коматической аберрации / А.И. Илларионов, О.В. Янчук // Тез. лек. и докл. X междунар. шк.-семинара по люмен. и лазер. физике. Иркутск, 2-6 окт. 2006 г. – Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2006. – С. 47.
14. Янчук, О.В. Влияние сферической аберрации волнового фронта основного излучения на процессы генерации второй гармоники в одноосных кристаллах / О.В. Янчук, А.И. Илларионов // Сб. докл. IX междунар. шк.-семинара по люмен. и лазер. физике. Иркутск, 2-6 окт. 2005 г. – Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2006. – С. 212-219.
15. Илларионов, А.И. Угловая структура второй гармоники с учётом коматической аберрации фокусирующей линзы / А.И. Илларионов, О.В. Янчук // Сб. докл. IX междунар. шк.-семинара по люмен. и лазер. физике. Иркутск, 2-6 окт. 2005 г. – Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 2006. – С. 287-291.
16. Янчук, О.В. Влияние аберраций фокусирующей линзы на угловую структуру второй оптической гармоники / О.В. Янчук, А.И. Илларионов // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития : сб. науч. тр. по материалам науч.-практ. конф. Одесса, 2005 г. – Одесса, 2005. – Т. 9. – С. 60-63.

Подписано в печать 14.01.09. Формат 60x84 1/16. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 120 экз. Заказ 4.

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИРКУТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
664003, Иркутск, бульвар Гагарина, 36; тел. (3952) 24–14–36

