

На правах рукописи

АНДРЕЕВА Наталья Владимировна

**ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
СФОКУСИРОВАННЫМИ НЕГАУССОВЫМИ ПУЧКАМИ**

Специальность: 01.04.21 - ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

АВТОРЕФЕРАТ

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

Санкт-Петербург 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель:

кандидат технических наук Кружалов Сергей Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Кожевников Николай Михайлович

кандидат технических наук Парфенов Вадим Александрович

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Защита состоится «30» ноября 2006 года в 16 час. 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу 195251, С.-Петербург, Политехническая ул., 29, II учебный корпус, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан «___» _____ 200__ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.01,

доктор технических наук

Коротков А.С.

Общая характеристика работы

Актуальность

В настоящее время в результате интенсивных исследований в области квантовой электроники решено большое количество теоретических и технических задач, позволивших освоить промышленный выпуск лазеров, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками.

Одним из важных направлений в квантовой электронике является нелинейная оптика. Методы нелинейно-оптического преобразования частоты позволяют создавать источники когерентного излучения, которые по ряду параметров превосходят лазеры, работающие в том же спектральном диапазоне. Особый интерес к нелинейно-оптическому преобразованию частоты обусловлен возможностью генерации лазерного излучения на новых длинах волн, в том числе в ИК- и УФ-диапазонах спектра (включая вакуумный УФ). В настоящее время, источники лазерного излучения в ИК и УФ спектральных диапазонах находят широкое применение в различных областях науки и технологии.

Развитие лазерных систем с нелинейным преобразованием частоты излучения происходит по пути увеличения КПД преобразования. Оптимизация эффективности преобразования достигается за счет развития адекватной теории нелинейного процесса и оптических схем для его реализации, поиску и выращиванию эффективных нелинейных материалов.

Одним из методов нелинейно-оптического преобразования частоты является генерация второй гармоники (ГВГ) лазерного излучения.

Существует класс задач по ГВГ лазерного излучения, для которых имеющиеся теоретические методы не позволяют адекватно решать задачу оптимизации преобразования. Например, для случая ГВГ излучения лазеров с негауссовым распределением интенсивности и относительно невысокой пиковой мощностью, требующих для повышения эффективности нелинейного

преобразования фокусировки излучения в нелинейный кристалл (НК). В частности, это относится к нелинейному преобразованию частоты излучения полупроводниковых лазеров и лазеров на парах меди.

Таким образом, актуальной является задача оптимизации эффективности ГВГ сфокусированными пучками, позволяющая учитывать влияние на КПД нелинейного процесса характер распространения негауссовых пучков, а также возникающий в ряде случаев при фокусировке излучения нелинейный режим преобразования.

Цель исследования. Цель диссертационной работы заключается в создании теории, описывающей ГВГ лазерного излучения сфокусированными пучками, которая позволяет проводить оптимизацию, как в случае негауссовых лазерных пучков, так и при нелинейном режиме преобразования.

Задачи исследования. Для достижения намеченной цели были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать существующие алгоритмы распространения лазерных пучков.
2. Разработать численный алгоритм распространения и преобразования негауссовых пучков.
3. Провести экспериментальное исследование распространения негауссовых пучков на примере медного лазера.
4. Изучить существующие модели нелинейного преобразования частоты лазерного излучения.
5. На основании результатов анализа существующих моделей нелинейного преобразования частоты лазерного излучения, а также экспериментального и теоретического исследования законов распространения негауссовых пучков, разработать модель, корректно описывающую ГВГ сфокусированными лазерными пучками, и позволяющую проводить оптимизацию в случае негауссовых лазерных пучков и в нелинейном режиме преобразования.

6. Провести экспериментальное исследование влияния параметров оптической схемы фокусировки на КПД ГВГ излучения ЛПМ.

7. Оценить работоспособность предлагаемой модели ГВГ сфокусированными пучками путем сравнения теоретических результатов и экспериментальных данных, полученных при ГВГ излучения ЛПМ для разной геометрии оптической схемы.

Научная новизна.

Предложен алгоритм распространения негауссовых пучков.

Разработана теория, описывающая ГВГ сфокусированными негауссовыми пучками.

Проведена оценка работоспособности предлагаемой модели посредством сравнения результатов эксперимента по ГВГ медного лазера при различной геометрии системы фокусировки (сферической и цилиндрической) и расчетных данных, полученных с использованием разработанной теории.

Практическая значимость. Разработанная теория ГВГ сфокусированными пучками, допускает преобразование негауссовыми пучками и в нелинейном режиме, и позволит оптимизировать процесс ГВГ для таких практически важных случаев как, например, создание источников лазерного излучения в ИК- и УФ-диапазонах спектра.

Разработанный алгоритм распространения и преобразования негауссовых пучков делает возможным определение параметров негауссовых лазерных пучков, что является актуальным при разработке и расчете оптических систем.

Выявлены условия оптимальной фокусировки для цилиндрической и сферической геометрии системы формирования излучения в НК при ГВГ ЛПМ.

Обнаружено, что при относительно невысокой плотности мощности преобразуемого лазерного излучения, как в случае используемого ЛПМ, сферическая фокусировка позволяет достигать больших эффективностей нелинейного преобразования, чем цилиндрическая.

Основные положения, выносимые на защиту.

- 1. Модель ГВГ лазерного излучения сфокусированными пучками,** позволяющая проводить оптимизацию, как в случае негауссовых лазерных пучков, так и при нелинейном режиме преобразования;
- 2. Алгоритм распространения и преобразования негауссовых лазерных пучков;**
- 3. Результаты экспериментального исследования** влияния геометрии оптической схемы реализации ГВГ лазерного излучения на эффективность преобразования в случае фокусировки излучения в НК.

Апробация работы. Основные положения диссертации представлены и обсуждены на:

- Конференции молодых ученых СПбГПУ (Санкт-Петербург, 2005)
- XXXI, XXXII, XXXIII Неделях науки СПбГПУ (Санкт-Петербург, 2002, 2003, 2004)
- Конференции «Лазеры. Измерения. Информация».(Санкт-Петербург, 2006)
- XII Конференции «Оптика лазеров» (Санкт-Петербург, 2006).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ. Работа получила диплом конкурса молодых ученых СПбГПУ (Санкт-Петербург, 2005).

Структура и объем работы

Диссертация содержит 120 страниц основного текста, 18 иллюстраций, 7 таблиц и состоит из четырех глав, введения, заключения и списка литературы.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы; сформулирована цель и поставлены задачи проводимых исследований; определены научная новизна и практическая значимость выполненных изысканий; приведены сведения о публикациях и апробации полученных

результатов, структуре диссертации; представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой обзор по проблеме оптимизации ГВГ лазерного излучения сфокусированными пучками в случае негауссовых лазерных пучков и при нелинейном режиме преобразования с позиций трех ключевых задач:

1. оптические схемы реализации ГВГ с фокусировкой лазерного излучения в НК;
2. алгоритмы распространения лазерных пучков;
3. характеристики негауссовых лазерных пучков, критерии качества лазерного пучка;
4. ГВГ лазерного излучения сфокусированными пучками.

Определены схемы нелинейного преобразования, для которых разработанная теория должна позволять проводить оптимизацию ГВГ лазерного излучения.

Проанализированы имеющиеся алгоритмы расчета КПД ГВГ лазерного излучения, а также распространения лазерных пучков с различным распределением интенсивности в поперечном сечении в свободном пространстве и в нелинейной среде.

Определено, что для описания негауссовых пучков, большинство авторов при моделировании законов распространения излучения пользуются M^2 -параметром или критерием качества пучка, рекомендованным международным стандартом ISO 11146:1999.

Выявлено, что наиболее развитой моделью, описывающей преобразования частоты в НК сфокусированными лазерными пучками, является аналитическая теория Бойда и Клейнмана. Однако, корректное использование теории для предварительной оценки КПД нелинейного

преобразования подразумевает выполнение ряда предположений: стационарный режим ГВГ, приближение заданного поля, гауссовы пучки.

Проведенный обзор показал, что модели нелинейного преобразования частоты лазерного излучения сфокусированными пучками, позволяющей учитывать влияние на эффективность процесса, как геометрии системы фокусировки, так и характеристик лазерного пучка и НК, на сегодняшний момент не существует.

На основании проведенного исследования оптических схем фокусировки излучения в НК можно сделать вывод о том, что задача оптимизации эффективности ГВГ по геометрии системы фокусировки является достаточно сложной и требует соответствующей адекватной теории для решения.

Вторая глава посвящена описанию разработанной теории ГВГ сфокусированными негауссовыми пучками, в основе которой лежит совместное использование двух численных алгоритмов:

1. моделирования ГВГ в НК (спектральный метод);
2. распространения излучения в свободном пространстве с помощью конечно-разностных схем аппроксимации для учета фокусировки излучения в НК.

Рассмотрены особенности использования выбранных алгоритмов для моделирования нелинейного преобразования частоты лазерного излучения сфокусированными пучками и их устойчивость. Проанализированы способы задания распределения напряженности светового поля в ортогональной к направлению распространения плоскости. Предложен метод описания распространения негауссовых пучков, основанный на знании M^2 -параметра.

Суть предлагаемой в работе теории состоит в следующем (рис. 1). К полученному экспериментально или заданному теоретически распределению напряженности светового поля излучения лазера после прохождения линзы применяется алгоритм численного моделирования распространения излучения

в свободном пространстве и находится распределение напряженности основного излучения на входной грани НК.

На следующем этапе НК с помощью опорных плоскостей, по направлению распространения излучения z , разбивается на N тонких слоев. Количество слоев определяется параметрами фокусировки. Входной плоскости НК соответствует опорная плоскость z_0 , выходной - z_{N+1} , промежуточным - z_k , индекс k увеличивается по мере распространения пучка по длине НК от 0 до $N+1$. В плоскости z_0 задается распределение напряженности поля основной волны в поперечном сечении.

Затем используется алгоритм численного моделирования процесса ГВГ (I шаг). Полученные на первом шаге комплексные напряженности основной волны и ВГ в опорной плоскости z_1 соответствуют тем, которые получились бы в результате численного моделирования нелинейного взаимодействия без учета фокусировки основного излучения в НК. Таким образом, рассчитанное распределение напряженности поля основной волны в плоскости z_1 в результате использования алгоритма, описывающего нелинейное взаимодействие, учитывает влияние процессов: истощения за счет перекачки мощности во ВГ, дифракции и, в случае синхронизма II типа, двулучепреломления.

Далее, для учета влияния фокусировки на найденное распределение напряженности основной волны в опорной плоскости z_1 , распределение проецируется в предыдущую опорную плоскость z_0 . К спроецированному распределению затем применяется алгоритм численного моделирования распространения сфокусированного излучения в среде с показателем преломления n . Метод матричной прогонки дает распределение напряженности поля основной волны в опорной плоскости z_1 в предположении, что на него влияет только процесс фокусировки.

Таким образом, в результате последовательного применения двух алгоритмов на одном шаге, находится распределение интенсивности основной

волны с учетом дифракции, двулучепреломления и фокусировки. Распределение интенсивности ВГ рассчитывается с использованием только одного алгоритма - моделирования нелинейного взаимодействия.

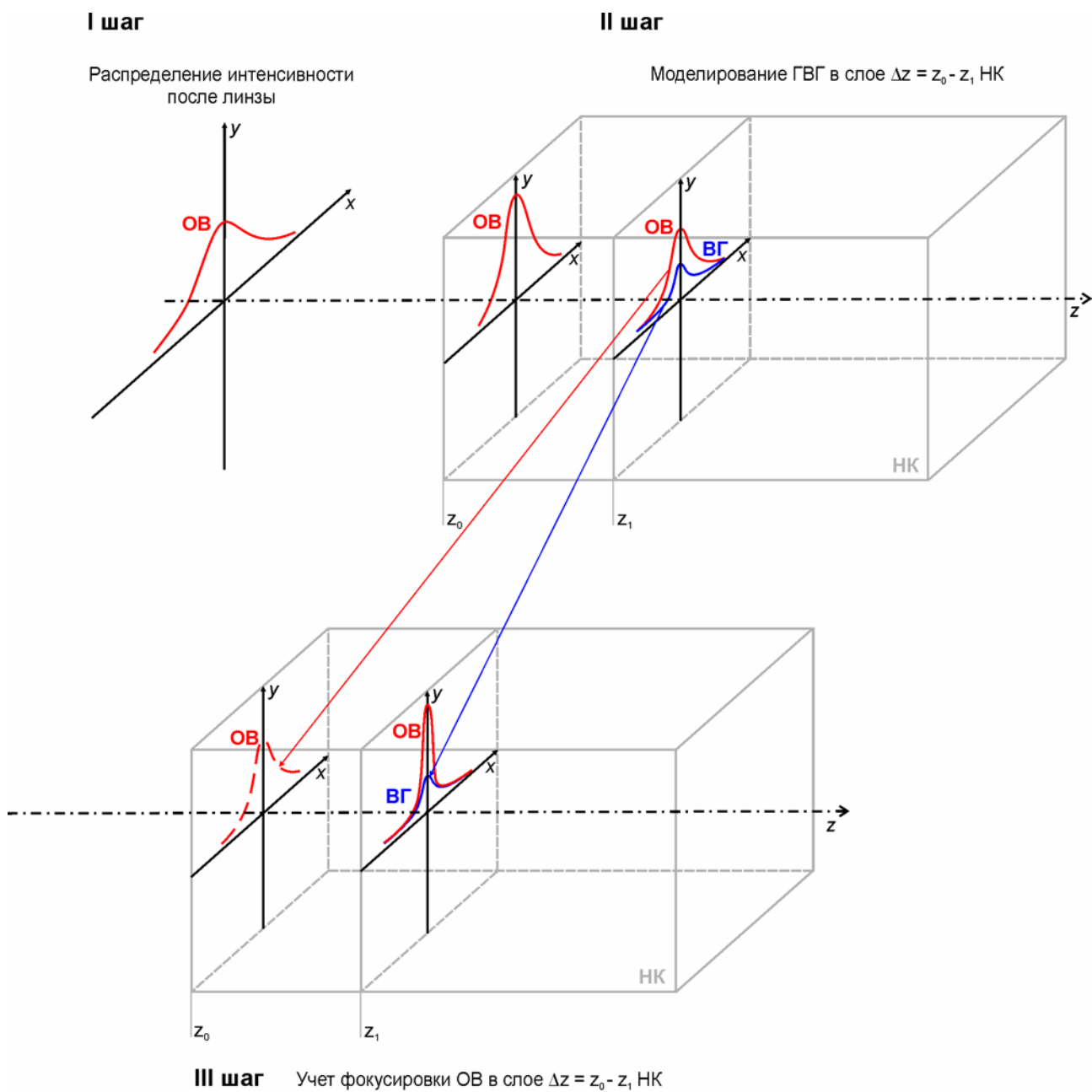


Рис.1. Пояснение к теории ГВГ лазерного излучения сфокусированными негауссовыми пучками.

Последовательность действий на следующем шаге расчета эффективности ГВГ аналогична: вначале рассматривается процесс нелинейного

взаимодействия волн в НК, затем влияние фокусировки на распределение интенсивности основной волны.

В качестве критерия проверки правильности работы предлагаемого метода был выбран закон сохранения энергии. На каждом шаге решения вычисляются энергия основной волны и ВГ, а также их сумма Σ .

В работе предлагается для задания напряженности светового поля лазерного излучения использовать M^2 -параметр. При этом предполагается, что волновой фронт пучка является сферическим, а распределение амплитуды напряженности поля задается в соответствии с экспериментальным распределением интенсивности. Определяя положение $z_{ng,0}$ и радиус $w_{ng,0}$ перетяжки, а также расходимость излучения θ_{ng} в дальнем поле размер пучка $w_{ng}(z)$ в любой плоскости вдоль направления распространения излучения OZ, задается как:

$$w_{ng}^2(z) = w_{ng,0}^2 + (z - z_{ng,0})^2 \theta_{ng}^2 \quad (1)$$

При этом для негауссова пучка выполняется соотношение:

$$w_{ng,0} \theta_{ng} = \frac{4\lambda M^2}{\pi}$$

В работе предлагается, по аналогии с выражением для изменения размеров пучка вдоль направления распространения, определить радиус кривизны волнового фронта негауссова пучка как:

$$R_{ng}(z) = z \left[1 + \left(\frac{w_{ng,0}}{\theta_{ng} z} \right)^2 \right] \quad \text{или} \quad R_{ng}(z) = z \left[1 + \left(\frac{w_{ng,0}}{M^2 \theta z} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Для моделирования распространения негауссовых пучков предлагается применять метод матричной прогонки, переопределяя волновой вектор k с учетом M^2 -параметра $k = \frac{2\pi}{\lambda M^2}$.

В третьей главе приводятся схемы экспериментальных установок для проверки работоспособности разработанной теории ГВГ лазерного излучения сфокусированными негауссовыми пучками:

1. Схема эксперимента по определению M^2 -параметра и оценке кривизны волнового фронта негауссова лазерного пучка.
2. Схема для исследования влияния параметров оптической схемы фокусировки излучения в НК (фокусного расстояния, увеличения) на эффективность нелинейного преобразования.
3. Схема для определения зависимости КПД ГВГ лазерного излучения от типа оптической схемы реализации нелинейного преобразования для двух случаев: сферической и цилиндрической системы фокусировки излучения в НК.

Определяются требования к организации экспериментального исследования ГВГ лазерного излучения сфокусированными пучками. Обосновывается выбор лазера для исследования и НК.

Для экспериментальной проверки предложенной модели нелинейного преобразования сфокусированными пучками был выбран лазер на парах меди (ЛПМ) со следующими характеристиками: средняя мощность излучения (суммарная на обеих линиях) составляла 1 Вт, соотношение средней мощности на зеленой линии к средней мощности на желтой линии – 3:2, частота следования импульсов 15.625 кГц, длительность импульса 30 нсек. Для реализации ГВГ излучения ЛПМ использовался НК ВВО размерами 10 x 6 x 4 мм.

Для получения информации о форме волнового фронта выходного излучения ЛПМ был проведен эксперимент по получению интерферограмм сдвига для двух ортогональных направлению распространения плоскостей пучка. Процедура экспериментального определения M^2 -параметра пучка

медного лазера проводилась в соответствии с международным стандартом ISO 11146:1999.

После экспериментального определения характеристик излучения ЛПМ, было проведено исследование зависимости эффективности нелинейного взаимодействия от геометрии пучка в НК при сферической и цилиндрической фокусировке излучения.

Полученные экспериментальные зависимости эффективности ГВГ излучения зеленой линии медного лазера от F -числа сферической и цилиндрической систем фокусировки приведена на рис.2.

Сравнение экспериментальных зависимостей КПД преобразования для разных типов оптических систем позволяет сделать следующий вывод: эффективность ГВГ излучения ЛПМ для схемы сферической фокусировки во всем диапазоне изменения F -числа больше, чем для схемы с цилиндрической фокусировкой излучения в НК. Из полученных экспериментальных зависимостей КПД ГВГ лазерного излучения от F -числа видно, что существует оптимальная геометрия оптической схемы, при которой реализуется максимальная эффективность нелинейного преобразования излучения ЛПМ. Экспериментально определенное значение F -числа, соответствующее оптимальной геометрии системы сферической фокусировки, равнялось 24.7, цилиндрической 11.4.

Согласно проведенному обзору литературы, цилиндрические схемы фокусировки должны обеспечивать большие эффективности нелинейного преобразования за счет оптимизации геометрии сфокусированного пучка в НК. Однако, очевидно, что при относительно невысоких плотностях мощности преобразуемого лазерного излучения, уменьшение КПД преобразования из-за снижения плотности мощности основного излучения в НК, происходящее при использовании цилиндрической фокусировки, имеет превалирующее влияние

над увеличением КПД преобразования, вследствие уменьшения расходимости в критической плоскости НК.

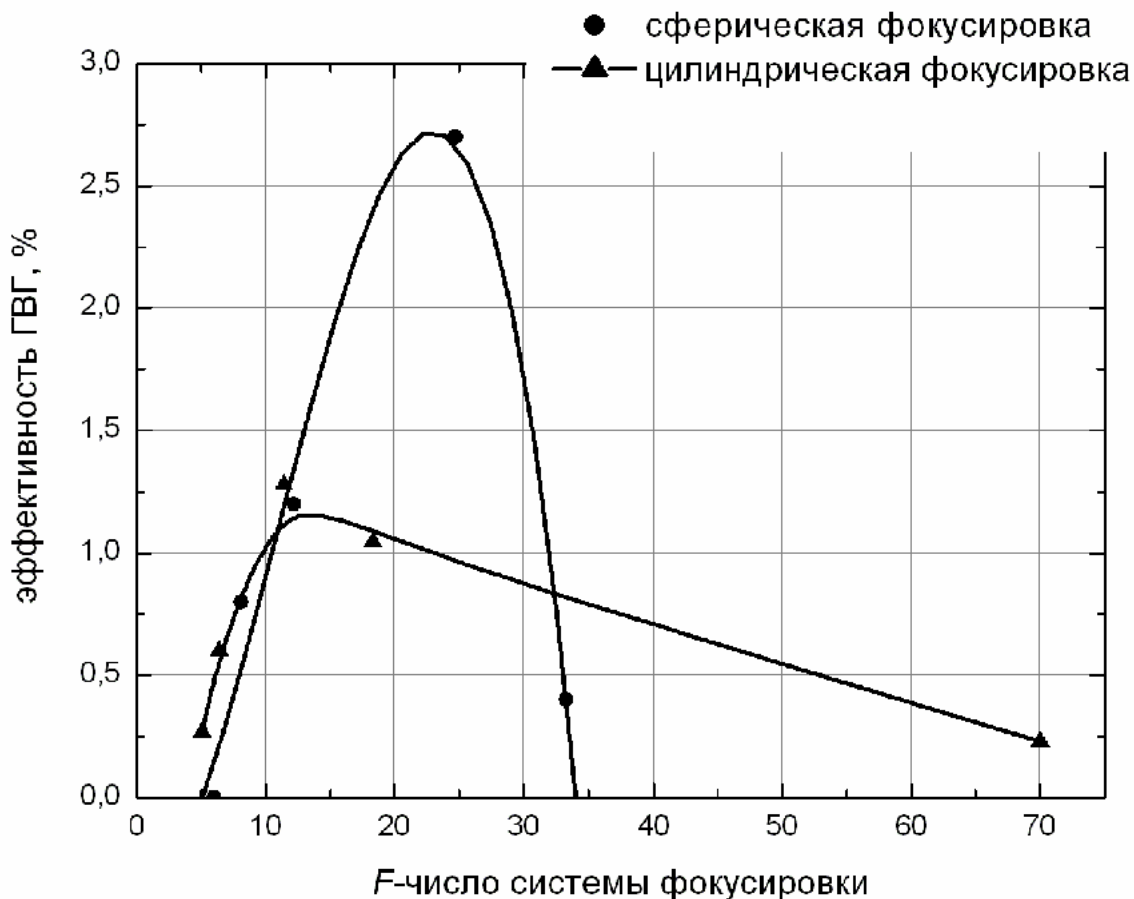


Рис. 2. Экспериментальные зависимости эффективности ГВГ излучения ЛПМ от F -числа системы фокусировки.

Четвертая глава посвящена обсуждению и обработке результатов экспериментального исследования ГВГ лазерного излучения сфокусированными пучками.

Качественный анализ интерферограмм выявил сферичность волнового фронта медного лазера, несмотря на то, что излучение ЛПМ не является гауссовым. Сферичность волнового фронта пучка ЛПМ позволила использовать для описания распространения излучения M^2 -параметр.

Процедура определения критерия качества лазерного пучка была проведена в соответствии с международным стандартом. Найденное значение M^2 -параметра использовалось для задания распределения напряженности светового поля излучения ЛПМ по формулам (1) и (2). Заданное таким образом распределение применялось для моделирования распространения излучения медного лазера с использованием алгоритма матричной прогонки.

Сравнение рассчитанных с помощью алгоритма матричной прогонки распределений интенсивности в поперечных сечениях пучка ЛПМ вдоль направления распространения с экспериментальными показало:

1. Размеры пучка в сечениях при теоретическом моделировании хорошо совпадают с экспериментальными;
2. При теоретическом моделировании распространения негауссова пучка с использованием M^2 -параметра происходит изменение имеющегося изначально неоднородного распределения интенсивности в поперечном сечении пучка, и он становится по распределению похожим на гауссов.

Рассчитанные с помощью M^2 -параметра характеристики излучения ЛПМ были использованы для определения геометрии пучка в НК через q -параметр. Найденные параметры пучка в НК использовались для вычисления КПД ГВГ по предлагаемому в работе методу расчета эффективности нелинейного взаимодействия сфокусированными негауссовыми пучками.

Сравнение результатов экспериментальных исследований ГВГ излучения ЛПМ с данными теоретических расчетов, произведенных с использованием алгоритмов распространения негауссовых пучков и ГВГ лазерного излучения сфокусированными негауссовыми пучками, для сферической и цилиндрической систем фокусировки показало: использование разработанной в диссертационной работе теории позволяет довольно точно предсказывать эффективность нелинейного преобразования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Анализ существующих алгоритмов распространения лазерных пучков показал их неадаптированность для моделирования распространения негауссовых пучков. Несмотря на введение международного стандарта для описания негауссовых пучков, его применение на практике встречает серьезные трудности.
2. В диссертационной работе предлагается для распространения негауссовых лазерных пучков использовать численный алгоритм матричной прогонки, переопределяя волновой вектор с учетом M^2 -параметра и задавая через M^2 -параметр радиус кривизны волнового фронта и размеры пучка, при экспериментальном распределении интенсивности в поперечном сечении пучка. Определяются требования, предъявляемые к поперечным размерам сетки, на которой задается экспериментальное распределение интенсивности лазерного излучения и к шагу интегрирования по продольной координате.
3. Применение разработанного алгоритма для моделирования распространения сфокусированного излучения ЛПМ выявило тот факт, что описание негауссова пучка с помощью M^2 -параметра позволяет правильно определять размеры пучка вдоль направления распространения, но искажает характер реального распределения интенсивности в поперечном сечении пучка.
4. Анализ существующих моделей нелинейного преобразования частоты лазерного излучения сфокусированными пучками выявил отсутствие адекватной модели, позволяющей учитывать влияние на эффективность процесса, как геометрии системы фокусировки, так и характеристик лазерного пучка и НК.
6. Экспериментальное исследование влияние параметров оптической схемы реализации ГВГ излучения ЛПМ показало, что как при сферической, так и при цилиндрической фокусировке излучения в НК, существует оптимальная

геометрия системы, при которой реализуется максимальная эффективность нелинейного преобразования.

7. Применение разработанной теории ГВГ лазерного излучения сфокусированными негауссовыми пучками к исследованию влияния параметров системы фокусировки на эффективность ГВГ излучения ЛПМ позволило рассчитывать КПД нелинейного преобразования для разных оптических схем, и, тем самым, успешно решать задачу оптимизации эффективности.

Основные научные результаты, полученные в диссертационной работе, отражены в следующих публикациях:

1. Андреева, Н.В. Новый метод расчета эффективности нелинейного преобразования частоты лазерного излучения сфокусированными пучками / Н.В. Андреева, С.В. Кружалов // Оптический журнал. – 2006. – Т. 73, № 8. – С. 58-60
2. Андреева, Н.В. Модель нелинейного преобразования частоты в случае фокусировки лазерного излучения в НК / Н.В. Андреева, С.В. Кружалов, В.Ю. Петрунькин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2006. – № 2. – С. 203-309.
3. Kruzhalov, S.Vl. Using spherical mirrors in astigmatic beam shaping systems / S.Vl. Kruzhalov, N.Vl. Mikheeva (Andreeva), Yu. M. Mokrushin // Proceedings of SPIE. – 2004. – Vol. 5447. – P. 23-25.
4. Андреева, Н.В. Моделирование нелинейного преобразования излучения сфокусированными пучками / Н.В. Андреева, С.В. Кружалов, Ю.М. Мокрушин // тез. докл. конф. Лазеры. Измерения. Информация. – Санкт-Петербург, 2006. – С.14.
5. Михеева, Н.В. Численное моделирование процесса генерации второй гармоники в схемах со сферической и линейной фокусировкой излучения в

нелинейный кристалл / Н.В. Михеева (Андреева), С.В. Кружалов // Материалы семинаров политехнического симпозиума «Молодые ученые – промышленности Северор-Западного региона». – Санкт-Петербург, 2006. – С. 51.

6. Кружалов, С.В. Системы формирования астигматических пучков на базе сферических зеркал / С.В. Кружалов, Н.В. Михеева (Андреева) // Тез. докл. Международной конф. Лазерная физика и применения лазеров. – Минск, 2003 Минск. – II – 135 с.