

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени П.Н. ЛЕБЕДЕВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

на правах рукописи

УДК 535:530.182

КИНЯЕВСКИЙ ИГОРЬ ОЛЕГОВИЧ

**ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ, СУММАРНЫХ И РАЗНОСТНЫХ
ЧАСТОТ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА НА ОКИСИ УГЛЕРОДА В
КРИСТАЛЛАХ $ZnGeP_2$ и GaSe**

специальность 01.04.21 лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2015

Работа выполнена в Лаборатории газовых лазеров Отделения Квантовой радиофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Ионин Андрей Алексеевич (ФИАН)

Научный консультант: кандидат физико-математических наук, доцент
Климачев Юрий Михайлович (ФИАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий лабораторией
Желтиков Алексей Михайлович (МГУ)
доктор физико-математических наук,
начальник лаборатории
Кузьмин Виктор Николаевич (ТРИНИТИ)

Ведущая организация: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва)

Защита состоится «26» октября 2015 года в 12-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при ФИАН по адресу: г. Москва, Ленинский проспект, д.53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, с авторефератом – на сайте института www.lebedev.ru

Автореферат разослан « » _____ 2015 г.

e-mail: postmaster@lebedev.ru

Учёный секретарь диссертационного совета

Д 002.023.03 при ФИАН

доктор физико-математических наук

Казарян Мишик Айразатович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Лазерное излучение среднего ИК-диапазона представляет большой интерес для широкого круга научных и технологических применений, таких как спектроскопия, фотохимия, фотобиология, лидарное зондирование и других [1]. Лазер на окиси углерода (СО лазер) может работать на сотнях линий в интервале длин волн λ от 4.6 до 8.2 мкм (основная или фундаментальная полоса колебательных переходов) и в интервале длин волн от 2.5 до 4.2 мкм (полоса переходов первого колебательного обертона) [2]. Возможность перестройки частоты излучения в широкой спектральной области среднего ИК-диапазона (перестройка по колебательно-вращательным переходам) наряду с высокой энергетикой и узкой стабильной линией генерации заметно выделяют СО лазер среди других лазерных источников среднего ИК-диапазона. Ниже представлен далеко не полный перечень задач, в которых использовался СО лазер: детектирование различных углеводородов (метан, этилен и др.) [3], в том числе в выдыхаемом человеком воздухе [4] и выделяемом листьями деревьев [5]; детектирование формальдегида (H_2CO) [6]; измерение соотношения концентрации между изотопами метана $^{12}\text{CH}_4$ и $^{13}\text{CH}_4$ [7]; изотопически-селективная диссоциация молекул карбонилхлорида (COCl_2); изотопно-селективное лазерное возбуждения молекул UF_6 для разделения изотопов урана [8] и другие.

Спектр СО лазера состоит из набора узких линий со средним расстоянием между ними $\sim 3 \text{ см}^{-1}$, поэтому возможность применения СО лазера при решении некоторых практических задач ограничена точностью совпадения частот лазерного излучения и линии поглощения требуемого вещества. Данная проблема может быть решена путем преобразования частоты излучения СО лазера в нелинейных кристаллах. Например, методом генерации второй гармоники и суммарных частот различных комбинаций линий излучения основной полосы СО лазера можно перекрыть интервал длин волн 2.4-4.1 мкм со средним расстоянием между линиями $\sim 0.01 \text{ см}^{-1}$. Увеличение числа

спектральных линий, поглощаемых различными веществами, приводит не только к расширению списка зондируемых газовых компонент, но и к улучшению чувствительности измерений концентраций благодаря выбору оптимальных линий поглощения [9].

Несмотря на свою привлекательность, преобразование частоты излучения СО лазера не получило широкого развития из-за невысокой эффективности. Максимальная ранее достигнутая эффективность генерации второй гармоники и суммарных частот излучения СО лазера была получена в кристалле $ZnGeP_2$ и составляла ~5% (внутренняя эффективность ~10%) [10]. Для сравнения, внешняя эффективность генерации второй гармоники CO_2 лазера в кристалле $ZnGeP_2$ достигает ~50% (внутренняя эффективность ~80%) [11]. Высокая эффективность преобразования частоты излучения CO_2 лазера достигалась благодаря использованию мощных наносекундных импульсов излучения.

Несмотря на то, что СО лазер тоже способен излучать наносекундные импульсы, ранее для накачки нелинейных кристаллов они не применялись. До последнего времени генерация наносекундных импульсов СО лазера была продемонстрирована только в двух работах [12, 13]. Однако в [12, 13] пиковая мощность лазерного излучения не превышала 2 кВт и, возможно, по этой причине эти работы не получили дальнейшего развития.

В лаборатории Газовых лазеров ОКРФ ФИАН на криогенной электроионизационной СО лазерной установке была продемонстрирована генерация наносекундных импульсов с длительностью от 5 до 15 нс с пиковой мощностью излучения до 70 кВт в селективном режиме (генерация излучения на одном колебательно-вращательном переходе) и до 120 кВт в неселективном режиме (генерация излучения на множестве колебательно-вращательных переходов) [14]. Появление такой лазерной системы дает возможность повышения эффективности параметрического преобразования частоты излучения СО лазера, тем самым вновь делает актуальными исследования по расширению и обогащению спектра излучения СО лазера в нелинейных кристаллах.

Цель работы и решаемые задачи.

Целью работы являлось исследование способов получения лазерного излучения в широкой области длин среднего ИК-диапазона путем генерации второй гармоники, суммарных и разностных частот излучения СО лазера в нелинейных кристаллах. Основной задачей была экспериментальная демонстрация высокой эффективности преобразования частоты мощных наносекундных импульсов излучения СО лазера в нелинейных кристаллах ZnGeP_2 и GaSe .

Для этого была разработана и исследована наносекундная СО лазерная система задающий генератор – лазерный усилитель, на которой также впервые было исследовано усиление наносекундных импульсов излучения в СО лазерном усилителе. Поскольку для достижения высокой эффективности преобразования необходимо выполнение фазового синхронизма взаимодействующих волн, предварительно были проведены расчёты углов фазового синхронизма генерации второй гармоники, суммарных и разностных частот в нелинейных кристаллах ZnGeP_2 и GaSe . Экспериментальная проверка рассчитанных углов фазового синхронизма проводилась с использованием излучения СО лазера низкого давления с модуляцией добротности резонатора.

В связи с этим были поставлены следующие **задачи**:

1. Рассчитать и проанализировать углы фазового синхронизма генерации второй гармоники, суммарных и разностных частот в нелинейных кристаллах ZnGeP_2 и GaSe для различных комбинаций длин волн излучения СО лазера, с целью перекрытия среднего ИК диапазона.

2. Экспериментально исследовать генерацию второй гармоники, суммарных и разностных частот в нелинейных кристаллах ZnGeP_2 и GaSe для различных комбинаций длин волн излучения СО лазера с модуляцией добротности резонатора.

3. Разработать СО лазерную систему задающий генератор – лазерный усилитель, излучающую мощные наносекундные импульсы излучения.

4. Экспериментально исследовать усиление наносекундных импульсов излучения СО лазера в СО лазерном усилителе.

5. Экспериментально исследовать генерацию второй гармоники и разностной частоты в нелинейных кристаллах ZnGeP_2 и GaSe , при накачке импульсами СО лазерного излучения наносекундной длительности.

Научная новизна

Впервые предложена и экспериментально продемонстрирована двухкаскадная генерация суммарных и разностных частот излучения СО лазера в одном образце нелинейного кристалла ZnGeP_2 . Получена как широкополосная двухкаскадная генерация суммарных и разностных частот в интервале длин волн 2.5-8.3 мкм при накачке кристалла ZnGeP_2 излучением неселективного СО лазера низкого давления, так и селективная двухкаскадная генерация второй гармоники и разностной частоты при накачке кристалла ZnGeP_2 излучением наносекундной СО лазерной системы, которое содержало две спектральные линии из различных колебательных полос. Впервые экспериментально исследовано усиление наносекундных импульсов излучения СО лазера в СО лазерном усилителе, при этом определена интенсивность насыщения усиления наносекундных импульсов - 14 ± 4 кВт/см². Впервые исследовано преобразование частоты мощных наносекундных импульсов СО лазера, при этом достигнута рекордная эффективность генерации второй гармоники в кристалле ZnGeP_2 - 37%.

Научно-практическая ценность работы

Достигнута высокая эффективность преобразования частоты наносекундных импульсов СО лазера, которая позволяет получить излучение с высокой мощностью в широкой области длин волн среднего ИК-диапазона для решения большого круга как научных, так и практических задач.

Генерация второй гармоники, суммарных и разностных частот излучения СО лазера в нелинейных кристаллах многократно увеличивает число спектральных линий, которые могут использоваться для газового анализа.

Разработана широкополосная СО лазерная система с преобразованием частоты, излучающая более 670 спектральных линий в интервале длин волн 2.5-8.3 мкм, который перекрывает несколько окон прозрачности атмосферы. Такая лазерная система может использоваться для многофункционального лидара или для оборонных систем подавления.

Проведенные расчёты углов фазового синхронизма различных вариантов преобразований в среднем ИК-диапазоне открывают большой потенциал для развития не только СО, но и других лазерных систем с преобразованием частоты в среднем ИК-диапазоне.

Величина интенсивности насыщения усиления наносекундных импульсов в СО лазерном усилителе, которая была получена в результате анализа экспериментальных данных, позволяет оценить предельные энергетических параметры при проектировании новых мощных наносекундных СО лазерных систем.

Положения, выносимые на защиту.

1. Интенсивность насыщения усиления наносекундных импульсов излучения СО лазера с длительностью больше времени вращательной релаксации, но меньше времени колебательной релаксации молекулы СО составляет $\sim 10^4$ Вт/см²

2. Эффективность генерации второй гармоники наносекундных импульсов СО лазера в кристалле ZnGeP₂ достигает 37%.

3. При накачке кристалла ZnGeP₂ излучением СО лазера, действующего одновременно на двух спектральных линиях, принадлежащих различным колебательным переходам молекулы СО, реализуется двухкаскадное преобразование частоты: генерация второй гармоники коротковолнового излучения и генерация разностной частоты между излучением второй гармоники и длинноволновым излучением накачки.

4. Благодаря некритичному спектральному фазовому синхронизму осуществляется широкополосная двухкаскадная генерация второй гармоники,

суммарных и разностных частот в интервале длин волн от 2.5 до 8.3 мкм при накачке кристалла ZnGeP_2 излучением неселективного СО лазера.

Апробация работы

Основные результаты работ докладывались на семинарах ФИАН, международных и российских конференциях, были опубликованы в 11 журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ, а также в трудах и материалах конференций. Список публикаций по теме диссертации приведён в конце автореферата.

Конференции:

- 6-ая международная конференция молодых учёных и специалистов «Оптика-2009», 19-23 октября, 2009
- IX International Conference “Atomic and Molecular Pulsed Lasers”, September 14-18, 2009, Tomsk, Russia;
- X International Conference “Laser & laser information technologies: fundamental problems & applications” and VI International Symposium “Laser technologies & laser”, October 18–22, 2009, Smolyan, Bulgaria;
- XIII международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых "Молодежь и наука", 2010, Москва;
- IV Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, 26-29 апреля, 2010, г. Саров;
- 14 International Conference on Laser Optics "LO-2010", 28 June - 02 July 2010, St.Petersburg, Russia;
- International Conferences ICONO/LAT 2010 Aug. 23-26, 2010, Kazan, Russia;
- XIV международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых "Молодежь и наука", 2011, Москва;
- VII международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2011», 17-21 октября, 2011, Санкт–Петербург; XIII Международная конференция по люминесценции и лазерной физике, 16-22 июля, 2012, п. Песчанка, Иркутская обл., Россия;
- 15th International Conference "Laser Optics 2012", June 25 - 29, 2012, St.Petersburg, Russia;
- XIX International Symposium on High Power Laser Systems and Applications, 10-14 Sept. 2012, Istanbul, Turkey;
- International conference SPIE Optics + Optoelectronics 2013, April 15 – 18, 2013, Prague, Czech Republic

Достоверность результатов

Достоверность расчетов углов фазового синхронизма подтверждается согласием с экспериментальными результатами по преобразованию частоты в нелинейных кристаллах. Достоверность полученных экспериментальных результатов по преобразованию частоты излучения СО лазера в нелинейных кристаллах $ZnGeP_2$ и $GaSe$ подтверждается согласием с результатами теоретических и экспериментальных работ других авторов, проведенных с СО и CO_2 лазерами. Достоверность проведенных энергетических, временных и спектральных измерений подтверждается использованием высокоточных откалиброванных отечественных и иностранных измерительных и регистрирующих приборов, многократно примененных в различных экспериментах.

Личный вклад соискателя

Все расчёты, представленные в диссертационной работе, включая расчёты углов фазового синхронизма и времени вращательной релаксации молекулы СО проведены непосредственно соискателем. Разработка и создание наносекундной СО лазерной системы задающий генератор – лазерный усилитель проводилась соискателем совместно с коллективом сотрудников лаборатории Газовых лазеров ФИАН под руководством кандидата физико-математических наук доцента А.А. Коткова. Все эксперименты по исследованию СО лазерных систем и преобразованию их частоты в нелинейных кристаллах, а также обработка полученных данных, проводились лично соискателем либо при его непосредственном участии.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, изложена на 130 страницах, включая 74 рисунка, одну таблицу, список литературы насчитывает 116 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы исследований, изложены цель работы, научная новизна, научная и практическая ценность работы, отмечены достоверность результатов и личный вклад соискателя. Также во **Введении** представлены выносимые на защиту положения, сведения об апробации работы и публикациях, сформулирована цель и задачи, необходимые для ее решения, а также описана структура диссертации.

Глава 1. Обзор литературы: СО лазер и преобразование его частоты в нелинейных кристаллах для газового анализа и лазерной химии.

В разделе 1.1 представлены общие сведения об особенностях работы СО лазера, его энергетических и спектральных характеристиках.

Поскольку для эффективного преобразования частоты излучения в нелинейных кристаллах необходима высокая мощность (интенсивность) излучения в разделе 1.2 рассматриваются существующие мощные СО лазерные системы, действующие как в непрерывном режиме, так и в импульсном режиме, с длительностью импульсов от миллисекунд до нескольких наносекунд.

В разделах 1.3 и 1.4 рассмотрены работы по применению излучения СО лазера для газового анализа и лазерной химии, а также работы, в которых обсуждаются перспективы и преимущества применения преобразованного в нелинейных кристаллах излучения.

В разделе 1.5 проведен анализ нелинейных кристаллов среднего ИК диапазона и результатов исследований преобразования частоты излучения СО лазера в этих кристаллах. На основе проведённого анализа сделан выбор кристаллов для экспериментальных исследований.

В разделе 1.6 приведены выводы по Главе 1.

Глава 2. Расчёт углов фазового синхронизма для преобразования частоты излучения СО лазера.

В разделе 2.1 описана методика расчётов углов фазового синхронизма в двулучепреломляющих одноосных кристаллах. Приводятся результаты расчётов углов фазового синхронизма для генерации второй гармоники в кристаллах

ZnGeP₂ и GaSe, а также расчёты угловой и спектральной ширины фазового синхронизма. Показано, что, благодаря не критичному спектральному фазовому синхронизму, в кристаллах ZnGeP₂ и GaSe возможна широкополосная генерация второй гармоники и суммарных частот основной полосы излучения СО лазера.

В разделе 2.2 приводятся результаты расчётов углов фазового синхронизма для генерации разностной частоты в интервале длин волн от 4 до 9 мкм в кристаллах ZnGeP₂ и GaSe. Показано, что при накачке кристаллов ZnGeP₂ и GaSe широкополосным излучением СО лазера возможна широкополосная двухкаскадная генерация суммарных и разностных частот в интервале длин волн 4-9 мкм.

В разделе 2.3 приводятся результаты расчётов углов фазового синхронизма для генерации разностной частоты в длинноволновую часть среднего ИК-диапазона. Показано, что при накачке кристалла GaSe излучением как основной, так и оберточной полос СО лазера возможна генерация разностной частоты в интервале длин волн от 10 до 20 мкм.

В разделе 2.4 приводятся выводы по Главе 2.

Глава 3. Экспериментальное исследование преобразования частоты излучения СО лазера в кристаллах ZnGeP₂ и GaSe.

В разделе 3.1 описывается экспериментальная схема по преобразованию частоты излучения неселективного СО лазера низкого давления с накачкой разрядом постоянного тока и модуляцией добротности резонатора в кристаллах ZnGeP₂ и GaSe. Лазер излучал импульсы длительностью ~1 мкс, следующие с частотой ~100 Гц. Средняя мощность излучения достигала 0.2 Вт, а пиковая мощность ~4 кВт. Спектр излучения СО лазера состоял из ~80 линий в интервале длин волн 4.96-6.3 мкм, с максимумом мощности вблизи длины волны 5.2 мкм.

В разделе 3.2 представлены экспериментальные результаты по генерации второй гармоники и суммарных частот неселективного излучения СО лазера в кристаллах ZnGeP₂ и GaSe. Максимальная внутренняя эффективность генерации второй гармоники и суммарных частот в кристалле ZnGeP₂ достигала 6% а в кристалле GaSe 0.26%. При этом спектр преобразованного излучения насчитывал

~110 линий в интервале длин волн 2.53-2.85 мкм с максимумом мощности вблизи 2.6 мкм. Большое количество спектральных линий в спектре преобразованного излучения связано с тем, что благодаря не критичному спектральному фазовому синхронизму одновременно происходит генерация суммарных частот множества пар линий из спектра излучения накачки.

В разделе 3.3 представлены результаты экспериментального исследования широкополосной двухкаскадной генерации суммарных и разностных частот излучения СО лазера низкого давления с модуляцией добротности резонатора (Рис. 1). При накачке кристалла $ZnGeP_2$ излучением СО лазера, действующего одновременно на ~150 спектральных линиях в интервале длин волн 5.0-7.5 мкм, было получено: ~350 линий излучения второй гармоники и суммарных частот в интервале длин волн 2.5-3.7 мкм; ~90 линий излучения разностных частот в интервале длин волн 4.3-5.0 мкм и ~80 линий в интервале длин волн 7.5-8.3 мкм.

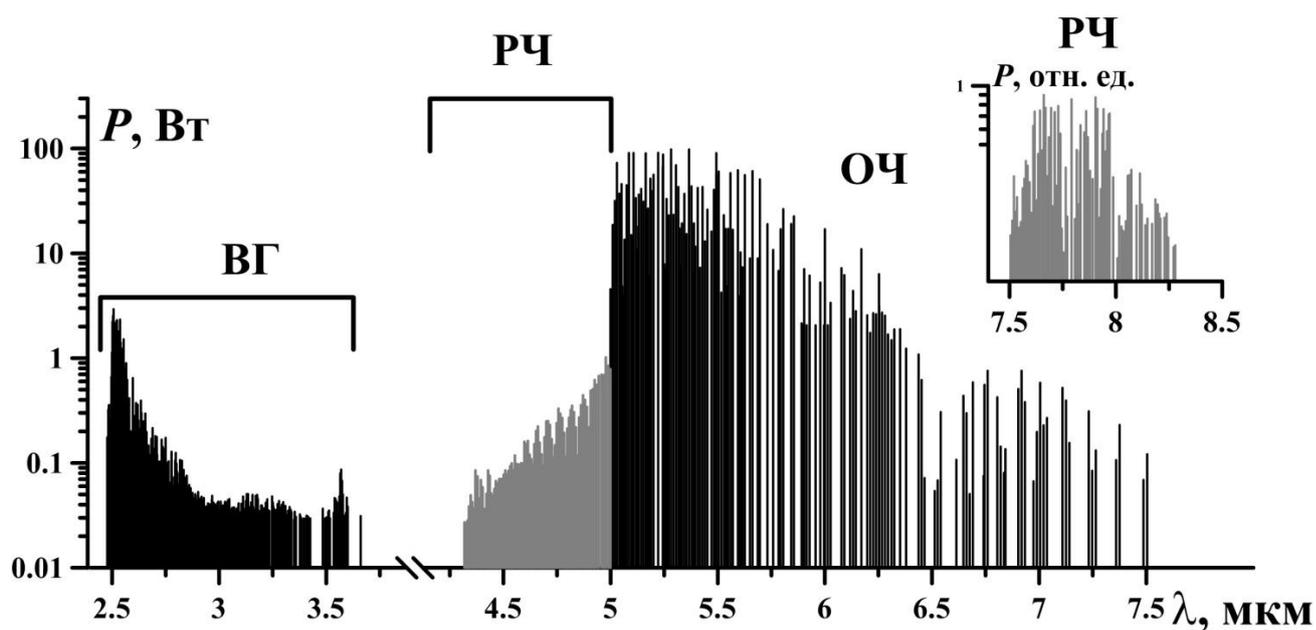


Рис. 1. Измеренные спектры излучения основной частоты (ОЧ) СО лазера, суммарных частот и второй гармоники (ВГ) и разностных частот (РЧ).

Внутренняя эффективность генерации второй гармоники и суммарных частот составила 2%, а внутренняя эффективность генерации разностной частоты в интервал длин волн 4.3-5.0 мкм составила 0.45% от мощности СО лазера накачки. Расчёт и анализ спектров показал, что измеренные спектральные линии

преобразованного излучения в действительности состоят из групп линий, близких по длине волны ($\Delta\lambda < 10^{-3}$ мкм), которые в эксперименте разрешить не удалось. Таким образом, на базе одного образца нелинейного кристалла с накачкой излучением одного СО лазера создана широкополосная (более полутора октав) лазерная система, действующая, по крайней мере, на ~670 линиях в интервале длин волн от 2.5 до 8.3 мкм.

В разделе 3.4 приводятся выводы по Главе 3.

Глава 4. Исследование преобразования частоты излучения мощного наносекундного СО лазера.

В разделе 4.1 описывается широкоапертурная электроионизационная криогенная лазерная установка, на основе которой создан мощный наносекундный СО лазер, описанный в [14]. Генерация наносекундных импульсов СО лазера осуществлялась в режиме активной синхронизации мод акусто-оптическим модулятором. Для увеличения эффективности преобразования частоты излучения в нелинейных кристаллах данный лазер был модернизирован в лазерную систему задающий генератор – лазерный усилитель, которая описывается в разделе 4.4.

В разделе 4.2 представлены экспериментальные результаты исследования генерации второй гармоники мощного наносекундного СО лазера. Излучение данного лазера представляло собой длинный (миллисекундный) цуг наносекундных импульсов (ЦНИ) (Рис. 2).

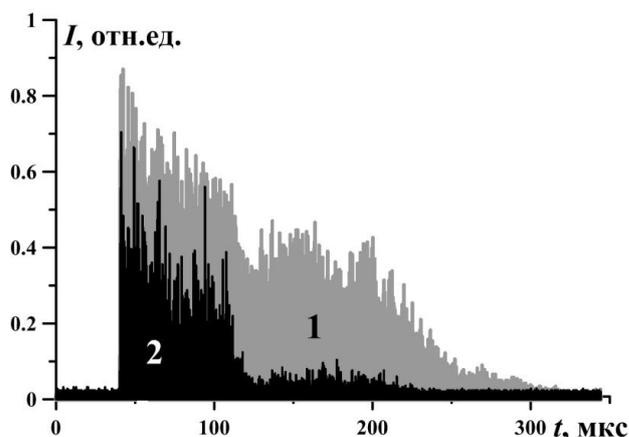


Рис. 2. Временная форма ЦНИ СО лазера с активной синхронизацией мод ($\lambda=5.3$ мкм) (1) и излучения второй гармоники (2).

Время на Рис. 2 (а также на Рис. 4, Рис. 6 и Рис. 8) отсчитывается от начала импульса электроионизационного разряда. Характерная длительность импульсов была ~ 10 нс. На Рис. 2 также представлена временная форма излучения второй гармоники, полученного в кристалле $ZnGeP_2$.

Наибольшая внутренняя эффективность преобразования длинного ЦНИ СО лазера (в режиме синхронизации мод) в кристалле $ZnGeP_2$ составляла 7%, при этом эффективность преобразования миллисекундного импульса СО лазера, действующего в режиме свободной генерации (без синхронизации мод), достигала 6% (Рис. 3). Внутренняя эффективность преобразования определялась как отношение энергии всего миллисекундного импульса (цуга) излучения накачки к энергии импульса (цуга) преобразованного излучения, с учетом оптических потерь на Френелевское отражение от непросветленных граней кристалла. Максимальная энергия излучения накачки ограничивалась оптическим пробоем кристалла.

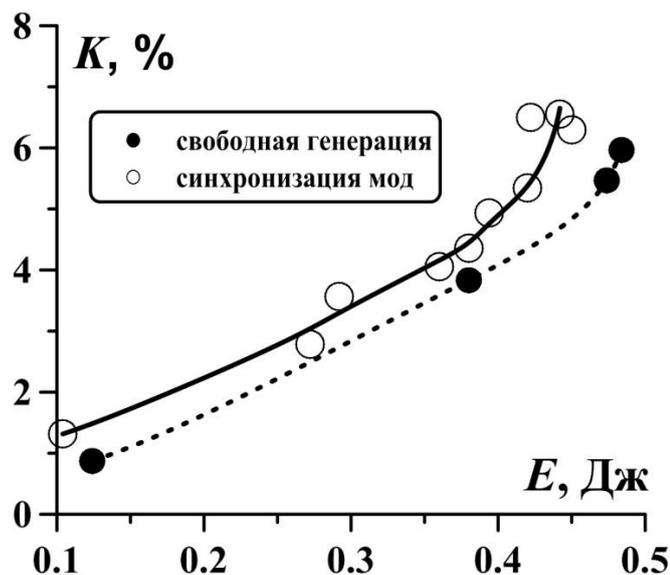


Рис. 3. Внутренняя эффективность генерации второй гармоники излучения СО лазера в кристалле $ZnGeP_2$ от энергии излучения накачки для режима синхронизации мод и для свободной генерации.

Незначительное отличие эффективности преобразования между этими режимами связано с нарушением режима синхронизации мод и уширением наносекундных импульсов при высоком коэффициенте усиления активной

среды. Проявление нарушения режима синхронизации мод видно из сравнения временной формы наносекундных импульсов на 41-ой и 80-ой микросекундах относительно начала импульса электроионизационного разряда (см. Рис. 4а и Рис. 4б).

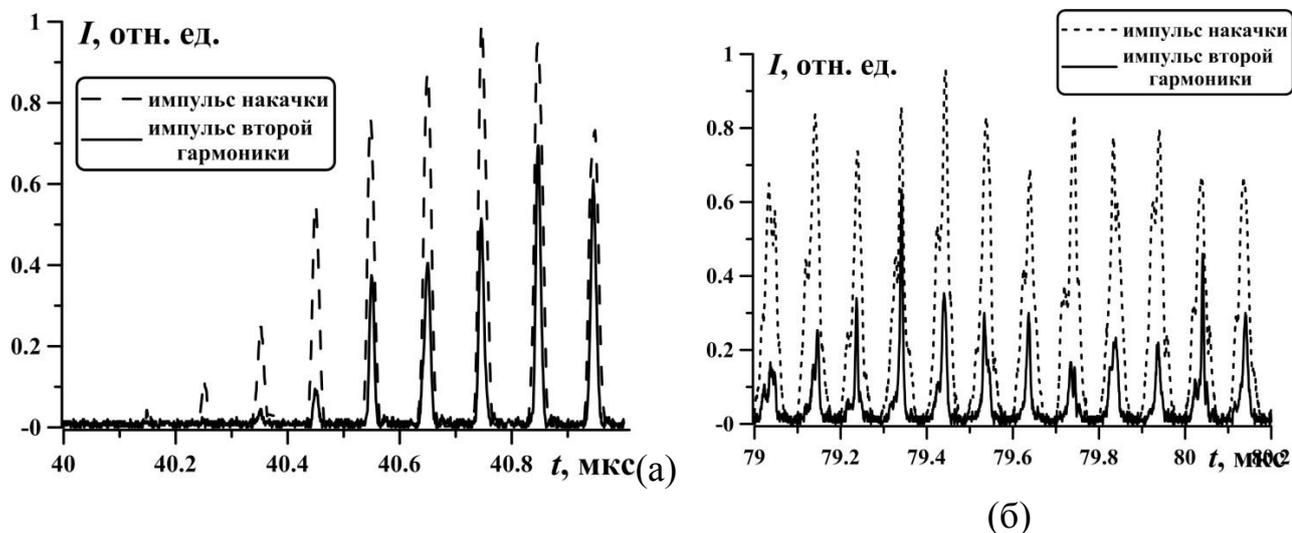


Рис. 4. Временная форма ЦНИ излучения СО лазера с активной синхронизацией мод ($\lambda=5.3$ мкм) и излучения второй гармоники на 41-ой (а) и 80-ой микросекунде (б).

В разделе 4.3 описывается исследование и оптимизация работы наносекундного СО лазера. Для устранения сбоев синхронизации мод во время генерации длинного цуга наносекундных импульсов СО лазер был модернизирован в СО лазерную систему задающий генератор (ЗГ) - лазерный усилитель (ЛУ), которая описана в разделе 4.4. На Рис. 5 представлена принципиальная оптическая схема СО лазерной системы ЗГ-ЛУ.

Режим синхронизации мод в ЗГ осуществлялся германиевым акустооптическим модулятором апертурой 8 мм с частотой модуляции 10 МГц, которая соответствует оптической длине резонатора ЗГ 15.0 м. Для увеличения мощности излучение ЗГ направлялось в канал ЛУ, организованный внутри той же самой широкоапертурной установки. Апертура усилительного канала составляла 24 мм по уровню 0.1, что соответствует площади поперечного сечения пучка 4.5 см^2 . Объёмы активной среды ЗГ и ЛУ совпадали и составляли 0.54 л. В качестве активной среды использовались газовые смеси СО:Аг=1:4 и

CO:He=1:4, возбуждаемые электроионизационным разрядом длительностью 35-40 мкс.

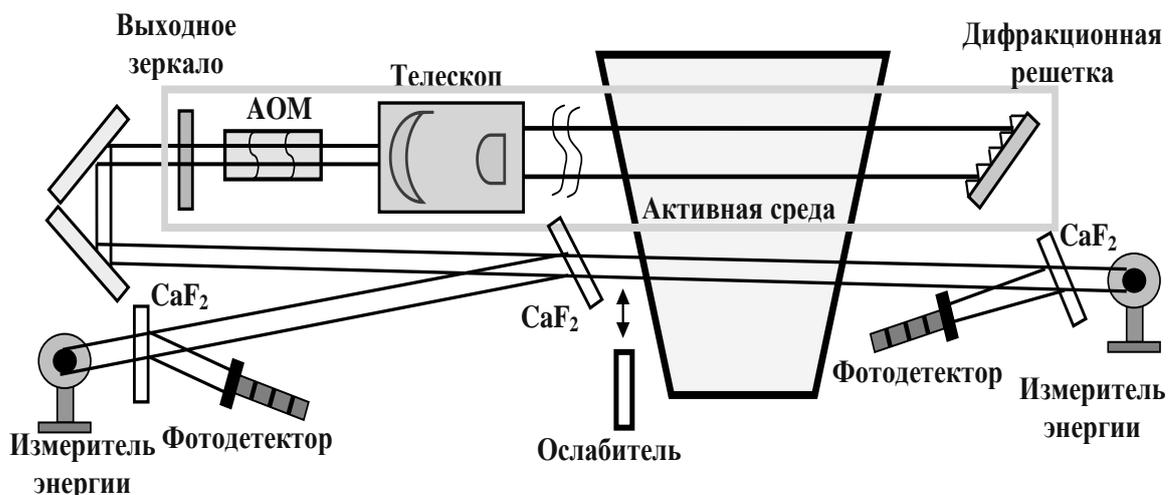


Рис. 5. Оптическая схема СО лазерной системы ЗГ-ЛУ

Использование оптической схемы задающий генератор - лазерный усилитель позволило не только стабилизировать режим синхронизации мод, но и увеличить пиковую мощность излучения до 120 кВт в селективном режиме и 380 кВт в неселективном.

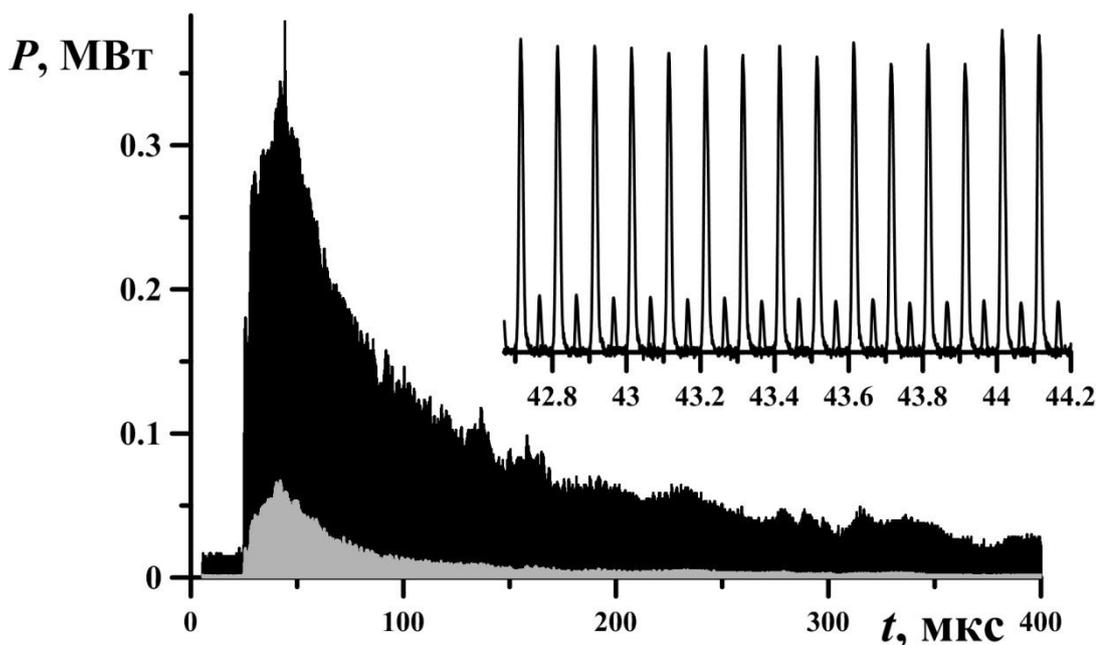


Рис. 6. Временная форма длинного цуга наносекундных импульсов излучения СО лазерной системы ЗГ-ЛУ (вставка 43-44 мкс), неселективный режим.

На Рис. 6 представлены ЦНИ на входе (нижний) и выходе (верхний) лазерного усилителя. Временная задержка между наносекундными импульсами до и после усиления связана с разницей оптических путей лазерных пучков до измерительной аппаратуры.

Оптическая схема ЗГ-ЛУ также позволила исследовать усиление ЦНИ в СО лазерном усилителе. Необходимо отметить, что ранее экспериментальные исследования усиления наносекундных импульсов излучения в СО лазерном усилителе не проводились. Из экспериментальных данных определено значение интенсивности насыщения усиления наносекундных импульсов в СО лазерном усилителе. Для этого рассчитывалась форма наносекундных импульсов на выходе лазерного усилителя при разных значениях интенсивности насыщения I_s , которая сравнивалась с измеренной формой импульса на выходе ЛУ. Для колебательно-вращательного перехода молекулы СО 9-8 P(11) ($\lambda=5.3$ мкм) интенсивность насыщения составила 14 ± 4 кВт/см².

В разделе 4.5 представлены результаты по исследованию генерации второй гармоники длинного ЦНИ СО лазерной системы ЗГ-ЛУ в нелинейных кристаллах. Лазерная система работала в селективном режиме на колебательно-вращательном переходе 9→8 P(10) $\lambda=5.27$ мкм. Излучения СО лазерной системы фокусировалось на кристалл ZnGeP₂ длиной 17 мм сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 50 см. Максимальная пиковая мощность излучения, при которой кристалл не разрушался, достигала 20 кВт при полной энергии ЦНИ до 0.1 Дж, при этом интенсивность излучения в ЛУ не превышала интенсивности насыщения.

Максимальная внутренняя эффективность генерации второй гармоники составила 25%. при положении кристалла на расстоянии 1 см за фокальной плоскостью (Рис. 7). При данном расположении кристалла (за фокальной плоскостью) расходимость лазерного пучка накачки компенсировала действие керровской и тепловой) линз, что давало более однородное распределение интенсивности излучения по всей длине кристалла.

Таким образом, реализация лазерной системы ЗГ-ЛУ и оптимизация режима синхронизации мод позволили увеличить внутреннюю эффективность генерации второй гармоники в нелинейном кристалле ZnGeP_2 в ~ 3.5 раза (до 25%) по сравнению с результатами, полученными в [разделе 4.2](#).

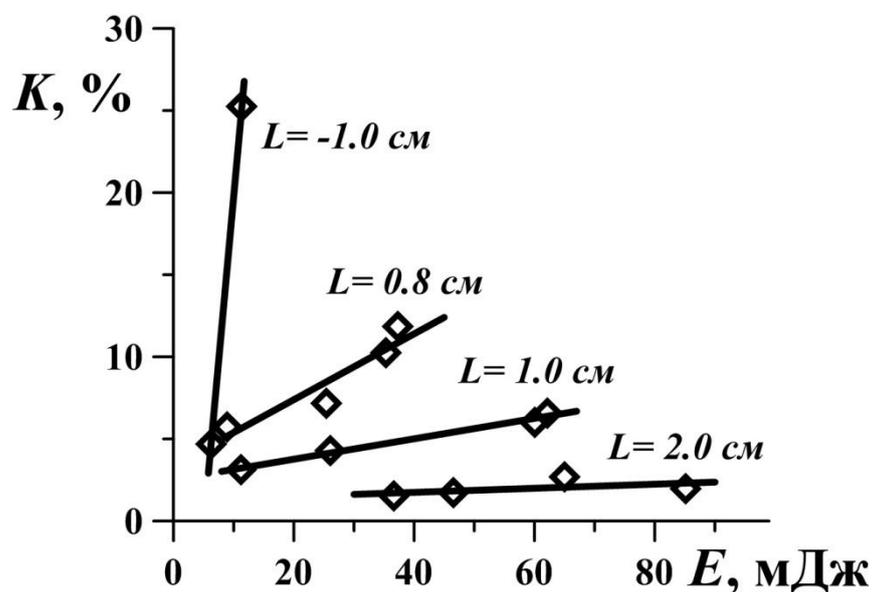


Рис. 7. Внутренняя эффективность генерации второй гармоники длинного ЦНИ СО лазерной системы ЗГ-ЛУ в кристалле ZnGeP_2 от энергии излучения накачки.

Необходимо отметить, что наносекундные импульсы на хвосте длинного цуга имеют значительно меньшую пиковую мощность, по сравнению с максимумом, что занижает полную эффективность преобразования. Кроме того, длинный хвост наносекундных импульсов приводит к нагреву кристалла, что также негативно влияет на эффективность преобразования и может приводить к образованию дефектов на гранях кристалла.

В [разделе 4.6](#) описывается модернизация СО лазерной системы ЗГ-ЛУ, направленная на устранение длинного хвоста ЦНИ. Для этого в задающий генератор лазерной системы было добавлено вращающееся зеркало, осуществляющее модуляцию добротности резонатора. Временная форма излучения лазерной системы с одновременной модуляцией добротности резонатора вращающимся зеркалом и активной синхронизацией мод представляла собой короткий (длительностью ~ 1 мкс) цуг наносекундных импульсов (Рис. 8).

Кроме того, для исследования селективного двухкаскадного преобразования частоты (генерация второй гармоники и разностной частоты) в нелинейном кристалле ZnGeP_2 был разработан резонатор ЗГ, позволяющий получить одновременную генерацию СО лазера на двух линиях из различных колебательных полос.

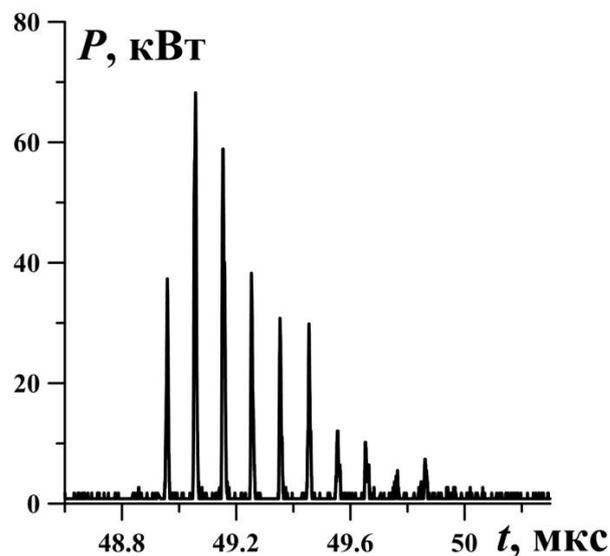


Рис. 8. Короткий ЦНИ СО лазерной системы ЗГ-ЛУ, в режиме синхронной генерации на переходах $9 \rightarrow 8$ P(9) ($\lambda=5.2$ мкм) и $16 \rightarrow 15$ P(9) ($\lambda=5.8$ мкм)

Пиковая мощность излучения СО лазерной системы достигала 0.1 МВт в селективном режиме (на одном колебательно-вращательном переходе), 0.8 МВт в неселективном режиме и 70 кВт в режиме синхронной генерации на двух линиях из различных колебательных полос.

В разделе 4.7 представлены результаты по преобразованию частоты излучения СО лазерной системы ЗГ-ЛУ, излучающий короткий ЦНИ в кристаллах ZnGeP_2 и GaSe.

При исследований генерации второй гармоники в кристалле ZnGeP_2 СО лазерная система ЗГ-ЛУ работала в селективном режиме на колебательно-вращательном переходе $9 \rightarrow 8$ P(9) ($\lambda=5.191$ мкм). Излучение фокусировалось линзой из CaF_2 с фокусным расстоянием 20 см. На Рис. 9 представлена зависимость внутренней эффективности генерации второй гармоники в кристалле ZnGeP_2 от энергии ЦНИ излучения накачки. Максимальная эффективность преобразования составила 37% при энергии короткого ЦНИ 20

~4.5 мДж и пиковой мощности ~60 кВт, что в 1.5 раза превышает эффективность генерации второй гармоники длинного ЦНИ.

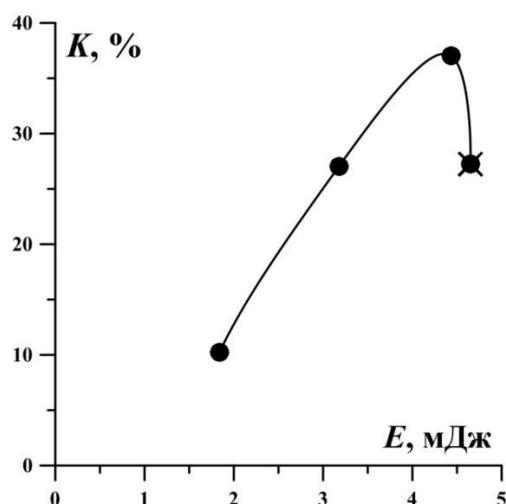


Рис. 9. Внутренняя эффективность генерации второй гармоники в кристалле $ZnGeP_2$ в зависимости от энергии короткого ЦНИ СО лазерной системы ЗГ-ЛУ

Дальнейшее повышение энергии ЦНИ приводило к оптическому пробую на задней грани кристалла, и эффективность преобразования уменьшалась. Оптический пробой задней грани кристалла $ZnGeP_2$ наступал значительно раньше, чем пробой передней грани вследствие образования керровской линзы внутри кристалла.

При исследовании генерации второй гармоники в кристалле GaSe длиной 6 мм излучение СО лазерной системы фокусировалось линзой из CaF_2 с фокусным расстоянием 30 см. Наибольшая внутренняя эффективность генерации второй гармоники составила ~5% при энергии ЦНИ 1.6 мДж и пиковой мощности ~35 кВт, что в 20 раз превышает эффективность в [разделе 3.2](#). При повышении энергии короткого ЦНИ эффективность преобразования снижалась. Повторное воздействие ЦНИ без смещения кристалла зачастую приводило к оптическому пробую на передней грани кристалла и резкому уменьшению эффективности преобразования. Образование оптического пробоя при повторном ЦНИ излучения лазера и снижение эффективности при повышении мощности излучения, по-видимому, связаны с образованием микро- и нанодфектов под воздействием лазерного излучения на кристалл. Образование и развитие таких дефектов на поверхности и в приповерхностном слое кристалла

GaSe, возникающих при интенсивностях ниже порога оптического пробоя, подробно исследовано в работе [15].

Оценки показывают, что эффективность преобразования частоты в кристалле GaSe, нормированная на квадрат длины кристалла, близка к эффективности в кристалле ZnGeP₂, что связано с близкими значениями их нелинейного коэффициента [16].

В разделе 4.7 также представлены результаты исследований по селективному двухкаскадному преобразованию частоты (генерация второй гармоники и разностной частоты) в кристалле ZnGeP₂. Лазерная система ЗГ–ЛУ в этих экспериментах работала в режиме синхронной генерации на двух колебательно-вращательных переходах 9→8 P(9) ($\lambda_1=5.191$ мкм) и 16→15 P(9) ($\lambda_2=5.804$ мкм). В первом каскаде преобразования происходила генерация второй гармоники с длиной волны $\lambda_3=2.596$ мкм, во втором каскаде происходила генерация разностной частоты с длиной волны $\lambda_4=4.695$ мкм вследствие смешения излучения второй гармоники с длиной волны $\lambda_3=2.596$ мкм и излучения СО лазера с длиной волны $\lambda_2=5.804$ мкм.

Максимальная внутренняя эффективность преобразования в разностную частоту составила 1.4% (относительно энергии ЦНИ излучения накачки), что в 3 раза выше эффективности, полученной в разделе 3.3.

В разделе 4.8 приводятся выводы по Главе 4.

В разделе Заключение приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Экспериментально реализована и исследована двухкаскадная генерация второй гармоники, суммарных и разностных частот неселективного излучения СО лазера в кристалле ZnGeP₂, в результате чего создана широкополосная (более полутора октав) лазерная система, действующая на ~670 линиях в интервале длин волн 2.5-8.3 мкм.

2. На базе электроионизационной лазерной установки создана и исследована СО лазерная система задающий генератор - лазерный усилитель, излучающая цуг импульсов длительностью ~ 10 нс, с полной длительность цуга от ~ 1 мкс до ~ 1 мс и пиковой мощность излучения до ~ 0.8 МВт в неселективном режиме, ~ 0.1 МВт в селективном режиме и ~ 70 кВт в режиме синхронной генерации на двух линиях из различных колебательных полос.

3. Экспериментально исследовано усиление наносекундных импульсов излучения СО лазера в СО лазерном усилителе. Определена интенсивность насыщения усиления наносекундных импульсов колебательно-вращательного перехода молекулы СО 9-8 P(11), которая составила 14 ± 4 кВт/см².

4. Исследовано преобразование частоты излучения СО лазерной системы с наносекундной длительностью импульсов в нелинейных кристаллах ZnGeP₂ и GaSe. Внутренняя эффективность генерации второй гармоники в кристалле ZnGeP₂ составила 25% для миллисекундного цуга наносекундных импульсов и 37% для микросекундного цуга наносекундных импульсов; в нелинейном кристалле GaSe - 5% для микросекундного цуга наносекундных импульсов

5. Экспериментально реализована и исследована селективная двухкаскадная генерация второй гармоники и разностной частоты в кристалле ZnGeP₂ при накачке кристалла микросекундным цугом наносекундных импульсов СО лазерной системы, действующей в режиме синхронной генерации на одном низком и одном высоком колебательно-вращательных переходах. Максимальная внутренняя эффективность преобразования излучения накачки на длинах волн 5.2 мкм и 5.8 мкм в разностную частоту с длиной волны 4.7 мкм составила $\sim 1.4\%$.

Результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

Статьи:

1 Андреев Ю.М., Ионин А.А., **Киняевский И.О.**, Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Ланский Г.В. Преобразование частоты СО-лазера в нелинейном кристалле $ZnGeP_2$ // Краткие сообщения по физике. 2010. N. 1. с. 19-21

2 **Киняевский И.О.**, Андреев Ю.М., Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Ланский Г.В. Преобразование излучения СО-лазера в нелинейных кристаллах в спектральный диапазон 1.25 – 1200 мкм // Приложение к журналу Физическое образование в вузах. 2010. Т. 16 (1). С. П42

3 Ionin A.A., Guo J., Zhang L.-M., Xie J.-J., Andreev Yu.M., **Kinyaevsky I.O.**, Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu., Kotkov A.A., Lanskii G.V., Morozov A.N., Zuev V.V., Gerasimov A.Yu. and Grigoryants S.M. Mode-locked CO laser frequency doubling in $ZnGeP_2$ with 25% efficiency // Laser Physics Letters. 2011. V. 8(10). P. 723-728

4 Андреев Ю.М., Зуев В.В., Ионин А.А., **Киняевский И.О.**, Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Ланский Г.В., Шайдуко А.В. Удвоение и смешение частот СО-лазеров в нелинейных кристаллах $ZnGeP_2$ и GaSe // Оптический журнал. 2011. Т. 78(2). С. 26-29

5 Ionin A., **Kinyaevskiy I.**, Klimachev Yu., Kotkov A., Kozlov A. Novel mode-locked carbon monoxide laser system achieves high accuracy // SPIE Newsroom: Lasers & Sources. 2011. DOI: 10.1117/2.1201112.004016

6 Антонюк Е.А., Герасимов А.Ю., Ионин А.А., **Киняевский И.О.**, Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А. Усиление цуга наносекундных импульсов в активной среде СО-лазера // Ядерная физика и инжиниринг. 2012. Т. 3(6). С. 354-359

7 Zhang Lai-ming, Xie Ji-Jiang, Guo Jin, Chen Fey, Jiang Ke, Andreev Yu.M., Ionin A.A., **Kinyaevskii I.O.**, Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu., Kotkov A.A.,

Lanskii G.V., Shaiduko A.V. CO laser frequency mixing in nonlinear crystal ZnGeP₂ and GaSe // Optics and Precision Engineering. 2012. V. 20(2). P. 277-286

8 Ionin A.A., **Kinyaevskiy I.O.**, Klimachev Yu.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Yu. Master Oscillator-Power Amplifier carbon monoxide laser system emitting nanosecond pulses // Optics Communications. 2012. V. 285. P. 2707-2714

9 Ionin A.A., **Kinyaevskiy I.O.**, Klimachev Yu.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Yu., Andreev Yu.M., Lanskii G.V., Shaiduko A.V., Soluyanov A.V. Cascaded carbon monoxide laser frequency conversion into the 4.3–4.9 μm range in a single ZnGeP₂ crystal // Optics Letters. 2012. V. 37(14). P. 2838–2840

10 Андреев Ю.М., Ионин А.А., **Киняевский И.О.**, Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Ланский Г.В., Шайдуко А.В. Широкополосная лазерная система на монооксиде углерода, действующая в интервале длин волн 2.5 – 8.3 мкм // Квантовая электроника. 2013. Т. 43(2). С. 139-143.

11 Budilova O.V., Ionin A.A., **Kinyaevskiy I.O.**, Klimachev Yu.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Yu. Mode-locked and Q-switched carbon monoxide laser system // Optics Communications. 2015. V. 345. P. 163–167

Тезисы и материалы конференций:

1 Андреев Ю.М., Ионин А.А., **Киняевский И.О.**, Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Ланский Г.В. Преобразование частоты излучения СО-лазера в нелинейных кристаллах $ZnGeP_2$ и GaSe. 6-ая международная конференция молодых учёных и специалистов Оптика-2009. Санкт-Петербург, СПбГУ ИТМО // Труды конференции. 2009. С.20-24

2. Андреев Ю.М., Герасимов А.Ю., Григорянц С.М., Ионин А.А., **Киняевский И.О.**, Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Ланский Г.В. Преобразование частоты излучения СО-лазера в нелинейных кристаллах в спектральный диапазон 1.25-3000мкм. XIII школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики» и IV школа–семинар «Инновационные аспекты фундаментальных исследований». Звенигород – Москва // Сборник трудов. 2010. С. 132.

3. Герасимов А.Ю., Григорянц С.М., Ионин А.А., **Киняевский И.О.**, Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А. СО-лазер с активной синхронизацией мод и усиление его излучения. XIII школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики» и IV школа–семинар «Инновационные аспекты фундаментальных исследований». Звенигород – Москва // Сборник трудов. 2010. С. 135

4. Антонюк Е.А., Герасимов А.Ю., Ионин А.А., **Киняевский И.О.**, Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А. Генерация и усиление наносекундных импульсов излучения в активной среде лазера на окиси углерода. 5-я школа по лазерной физике. г. Саров // Сборник докладов. 2011. С. 149

5. Андреев Ю.М., Антонюк Е.А., Герасимов А.Ю., Ионин А.А., **Киняевский И.О.**, Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Ланский Г.В. Преобразование частоты излучения лазера на окиси углерода в нелинейных кристаллах. VII международная конференция молодых ученых и специалистов Оптика–2011. СПб: НИУИТМО // Сборник трудов. 2011. С.8

6. Андреев Ю.М., Ионин А.А., **Киняевский И.О.**, Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Ланский Г.В. Удвоение частоты СО-лазера в

кристалле $ZnGeP_2$ с внутренней эффективностью 25%. 5 Всероссийская молодежная конференция «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики». Москва, ФИАН // Сборник трудов. 2011. С.28

7. Ionin A.A., **Kinyaevskiy I.O.**, Klimachev Yu.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Y. MOPA carbon monoxide laser system emitting nanosecond pulses // Proceedings SPIE. 2012. V. 8238. P. 82380D-1.

8. Будилова О.В., Ионин А.А., **Киняевский И.О.**, Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А. СО-лазер с модуляцией добротности резонатора вращающимся зеркалом и синхронизацией мод. Российская молодежная конференция по физике и астрономии “ФизикА.Спб”. Санкт Петербург // Тезисы докладов. 2013. С. 184

9. Андреев Ю.М., Ионин А.А., **Киняевский И.О.**, Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А. Генерация второй гармоники микросекундного цуга наносекундных импульсов излучения СО лазера в кристалле $ZnGeP_2$. V Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики. Москва, ФИАН // Сборник трудов. 2013. С. 44

10. Kotkov A.A., Ionin A.A., **Kinyaevskiy I.O.**, Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu. Short pulse CO laser systems and their applications in nonlinear IR optics. International Conference Laser Optics 2014. June 30 2014-July 4 2014. Saint Petersburg. Russia // 2014. IEEE Xplore digital library. DOI: 10.1109/LO.2014.6886264

11 Будилова О.В., **Киняевский И.О.**, Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Сафонов Д.А., Ионин А.А. Генерация второй гармоники и разностной частоты в нелинейных кристаллах $ZnGeP_2$ и GaSe. 18-ая Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодежь и наука» 2014. Москва, НИЯУ МИФИ // Тезисы докладов. 2015. Ч. 2. С. 80-81

Список литературы, цитированной в автореферате:

1. Majid Ebrahim-Zadeh, Irina T. Sorokina MID-INFRARED COHERENT SOURCES AND APPLICATIONS // Ebrahim-Zadeh M., Sorokina I.T. –Springer, Published in cooperation with NATO Public Diplomacy Division. 2008. – 625 P.
2. Ionin A.A. Electric Discharge CO Lasers // in Gas Lasers ed. Masamori Endo and Robert F. Walter. New York.: Taylor & Francis Group. 2007. P. 201-238
3. Mürtz M., Kauser T., Klaine D., Stry S., Hering P., Urban W. Recent developments in cavity ring-down spectroscopy with tunable cw lasers in the mid-infrared // Proceedings SPIE. 1999. Vol. 3758. P. 53-61
4. Dahnke H., Klaine D., Urban W, Hering P., Murtz M. Real-time monitoring of ethane in human breath using mid-infrared cavity leak-out spectroscopy // Applied Physics B. 2001. Vol. 72(8). P. 971-975
5. Martis A.A. E, Bucher S., Kuhnemann F., Urban W. Simultaneous ethane and ethylen detection using a CO-overtone laser photoacoustic spectrometer: a new tool for stress/damage studies in plant physiology // Instrumentation Science & Technology. 1998. Vol. 26(2&3). P. 177-187
6. Dahnke H., von Basum G., Kleinermanns K., Hering P., Murtz M. Rapid formaldehyde monitoring in ambient air by means of mid-infrared cavity leak-out spectroscopy // Applied Physics B. 2002. Vol. 75. P. 311-316
7. Dahnke H., Klaine D., Urban W, Hering P., Murtz M. Isotopic ratio measurement of methane in ambient air using mid-infrared cavity leak-out spectroscopy // Applied Physics B. 2001. Vol. 72(1). P. 121-125
8. Baoyu Xu, Yong L., Wenbo D., Wi Zh., Jianxun Hu, Chengfa Zh. Study of the vibrational photochemical reaction of uranium hexafluoride + hydrochloric acid and its isotopic selectivity // Journal of Physical Chemistry. 1992. Vol. 96. P. 3302-3305.
9. Гейко П.П., Романовский О.А., Харченко О.В. Возможность преобразования частоты CO₂- и CO-лазеров в монокристалле Tl₃AsSe₃ для целей

газоанализа атмосферы // Журнал прикладной спектроскопии. 1992. Т. 56(5-6). С. 774-780

10. Андреев Ю.М., Говдей С.Н., Гейко П.П., Грибенюков А.И., Гурашвили В.А., Зуев В.В., Изюмов С.В. Многочастотный лазерный источник диапазона 2,6 - 3,2 мкм. // Оптика атмосферы и океана. 1988. Т. 1(04). С. 124-126

11. Андреев Ю.М., Баранов В.Ю., Воеводин В.Г., Гейко П.П., Грибенюков А.И., Изюмов С.В., Козочкин С.М., Письменный В.Д., Сатов Ю.А., Стрельцов А.П. Эффективная генерация второй гармоники наносекундного импульсного излучения CO₂-лазера // Квантовая электроника. 1987. Т. 14(11). С. 2252-2254

12. Nurmikko A.V. Mode locking of a TEA CO laser // Applied Physics letters. 1974. Vol. 25(8). P. 465-466

13. Nurmikko A.V. Forced mode locking of a single-line high-pressure CO laser // Journal of Applied Physics. 1975. Vol. 46(5). P. 2153-2154

14. Ionin A.A., Klimachev Y.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Yu., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. Carbon monoxide laser emitting nanosecond pulses with 10 MHz repetition rate // Optics Communication. 2009. Vol. 282(2). P. 294-299

15. Гуо Д., Се Д.-Д., Жанг Л.-М., Чен Ф., Дзянг К., Ионин А.А., Климачев Ю.М., Киняевский И.О., Козлов А.Ю., Котков А.А., Андреев Ю.М., Ланский Г.В., Шайдуко А.В., Светличный В.А. Предельный порог накачки кристаллов GaSe фемтосекундными импульсами // Известия Высших Учебных Заведений (Физика). 2013. Т. 56(2/2). С. 115-121

16. Nikogosyan D.N. Nonlinear optical crystals: a complete survey. New York.: Springer. 2005. 427 p.