

**ОТЗЫВ**  
официального оппонента на диссертацию  
Киняевского Игоря Олеговича

«Генерация второй гармоники, суммарных и разностных частот излучения лазера на окиси углерода в кристаллах ZnGeP<sub>2</sub> и GaSe», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 Лазерная физика

**Актуальность темы исследований.** В настоящее время существует большое число задач (создание систем контроля природной среды путем лазерного зондирования атмосферы; зондирование многокомпонентных газовых смесей, колебательно- и электронно-возбужденных неравновесных газовых сред, низкотемпературной плазмы; управление химическими реакциями путем селективного фотовоздействия; разделение изотопов; использование в лазерной хирургии для коагуляции кровеносных сосудов и опухолей и др.), в которых возможно применение излучения СО лазера. Возможность применения СО лазера для решения вышеперечисленных задач определяется точностью совпадения частот лазерного излучения и линий поглощения исследуемого вещества, что требует наличия большого числа линий излучения лазера. Эта проблема может быть решена за счет обогащения спектра излучения СО лазера при преобразовании его частоты в нелинейных кристаллах методом генерации второй гармоники, суммарных и разностных частот различных комбинаций линий излучения. Использование преобразования частоты СО лазера на нелинейных кристаллах позволит существенно обогатить спектр излучения СО лазера и расширить набор длин волн, которые могут быть использованы для зондирования газовых компонент. Кроме того, такое обогащение спектра излучения СО лазера позволит улучшить чувствительность измерений концентраций за счет выбора оптимальных линий поглощения, расширить список зондируемых газовых

компонент, а также откроет новые возможности решения практических задач лазерной физики.

Поэтому тема диссертации И.О. Киняевского по обогащению и расширению спектрального состава излучения лазера на окиси углерода путем преобразования частоты его излучения на нелинейных кристаллах при использовании получивших в последнее время развитие СО лазерных систем, генерирующих мощные импульсы излучения наносекундных длительностей, является актуальной.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Структура и логика изложения материала диссертации соответствуют поставленным задачам исследования. Для решения поставленных в работе задач автор использует расчетно-теоретические методы, а также современные методы проведения экспериментальных исследований. В диссертации проанализированы 116, как расчетно-теоретических, так и экспериментальных работ в области проводимых исследований.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во введении диссидентом обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, показана научная новизна проведенных исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также указана практическая значимость полученных в диссертации результатов.

В Главе 1 рассмотрены работы по исследованию применения излучения СО лазеров в анализе газовых компонент и разделении изотопов. Приведены сведения о спектральном составе и энергетических характеристиках излучения СО лазеров. Показано, что диапазон перестройки частоты излучения СО лазера весьма широк и перекрывает спектральные диапазоны, в которых расположены полосы поглощения большого количества газов, органических соединений, а также токсичных и взрывчатых веществ.

Подробно рассмотрены вопросы использования излучения СО лазера, как в детектировании отдельных веществ, так и в спектроскопии многокомпонентных газовых смесей. Поскольку спектральная ширина линий излучения СО лазера в среднем ИК диапазоне, в котором находятся линии и полосы поглощения различных веществ, мала, это позволяет использовать его излучение для селективного возбуждения веществ в таком важном направлении исследований, как лазерная химия и разделение изотопов.

Проведен анализ нелинейных кристаллов, используемых для преобразования частоты излучения среднего ИК диапазона, который показал, что наиболее подходящими для преобразования частоты излучения СО лазера являются кристаллы  $ZnGeP_2$  и  $GaSe$ , которые и были использованы для проведения исследований в рамках данной диссертационной работы.

Сделан обзор достижений в создании СО лазеров с высокой мощностью излучения при работе в непрерывном, импульсном и импульсно-периодическом режимах. Поскольку для высокой эффективности преобразования частоты излучения в нелинейных кристаллах СО лазер должен работать в импульсном или импульсно-периодическом режимах, в работе особое внимание уделено именно таким типам СО лазеров.

В Главе 2 приведены результаты расчетов условий фазового синхронизма генерации суммарных и разностных частот различных комбинаций длин волн СО лазера для получения излучения в среднем и дальнем ИК диапазонах длин волн. Сделан расчет углов фазового синхронизма генерации второй гармоники и суммарных частот, а также расчет углов фазового синхронизма генерации излучения в спектральном интервале 4.0÷9.0 мкм в кристаллах  $ZnGeP_2$  и  $GaSe$ . Для определения возможности получения лазерного излучения в длинноволновой части ИК диапазона длин волн (10÷20 мкм) приведены результаты расчетов углов фазового синхронизма генерации излучения с длиной волны более 10 мкм в кристалле  $GaSe$ . Проведенные расчеты показали, что в кристаллах  $ZnGeP_2$  и  $GaSe$  выполняется некритичный фазовый синхронизм, позволяющий практически

весь спектр основной полосы СО лазера преобразовать во вторую гармонику и суммарные частоты.

В Главе 3 приведены результаты экспериментальных исследований генерации суммарных и разностных частот излучения неселективного СО лазера низкого давления с модуляцией добротности резонатора в кристаллах ZnGeP<sub>2</sub> и GaSe. Экспериментально показано, что практически весь широкий спектр неселективного СО лазера преобразуется во вторую гармонику и суммарные частоты, при этом спектр преобразованного излучения содержит значительно больше линий, чем спектр излучения накачки. В результате проведенных исследований на базе одного нелинейного кристалла ZnGeP<sub>2</sub> с накачкой излучением одного СО лазера создана широкополосная лазерная система, работающая в диапазоне длин волн от 2.5 мкм до 8.3 мкм на ~670 линиях излучения.

В Главе 4 приведены результаты экспериментальных исследований преобразования частоты в кристаллах ZnGeP<sub>2</sub> и GaSe излучения мощного импульсного электроионизационного СО лазера.

Приводятся результаты оптимизации СО лазерной системы «задающий генератор – усилитель» с целью увеличения мощности излучения для повышения эффективности преобразования частоты в нелинейных кристаллах, а также результаты исследования генерации излучения СО лазера и усиления полученных наносекундных импульсов в СО лазерном усилителе.

Экспериментально установлено, что внутренняя эффективность генерации второй гармоники миллисекундного цуга наносекундных импульсов излучения СО лазера в кристалле ZnGeP<sub>2</sub> составила 25%, микросекундного цуга наносекундных импульсов – 37%. В кристалле GaSe внутренняя эффективность генерации второй гармоники микросекундного цуга наносекундных импульсов излучения СО лазера составила 5%.

В Заключении сформулированы основные результаты и выводы проведенного исследования.

**Научная новизна полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** К наиболее важным научным результатам проведенного исследования, характеризующим его новизну, могут быть отнесены:

- результаты расчета углов фазового синхронизма генерации суммарных и разностных частот излучения основной и обертонной полос СО лазера в кристаллах ZnGeP<sub>2</sub> и GaSe, которые могут быть использованы для получения генерации излучения в широкой области спектра;
- впервые полученные результаты экспериментальных исследований двухкаскадной генерации суммарных и разностных частот излучения СО лазера в одном образце нелинейного кристалла ZnGeP<sub>2</sub>, и получение, как широкополосной двухкаскадной генерации суммарных и разностных частот в интервале длин волн 2.5÷8.3 мкм при накачке кристалла излучением неселективного СО лазера низкого давления, так и селективной двухкаскадной генерации второй гармоники и разностной частоты при накачке кристалла наносекундными импульсами, генерируемыми СО лазерной системой, излучение которой содержало две спектральные линии из различных колебательных полос;
- впервые полученные результаты исследований на созданной СО лазерной системе «задающий генератор – усилитель», генерирующей пуг наносекундных импульсов с пиковой мощностью до 0.8 МВт, результаты экспериментальных исследований усиления этих импульсов излучения в СО лазерном усилителе, и определение интенсивности насыщения усиления одиночного наносекундного импульса, которая составила величину  $14\pm4 \text{ кВт/см}^2$ ;
- впервые полученные результаты исследований преобразования частоты мощных наносекундных импульсов излучения СО лазера и получения рекордной эффективности генерации второй гармоники в кристалле ZnGeP<sub>2</sub> – 37 %.

**Значимость для науки и практики результатов, выводов и рекомендаций, полученных в диссертации.** Теоретическая значимость исследования состоит в расчете и анализе условий фазового синхронизма генерации второй гармоники, суммарных и разностных частот в нелинейных кристаллах для различных комбинаций длин волн излучения СО лазера с целью получения излучения в среднем и дальнем ИК диапазоне. Проведенные расчеты углов фазового синхронизма различных вариантов преобразований в среднем и дальнем ИК диапазоне позволяют создавать СО лазерные системы с преобразованием частоты для перекрытия спектральных диапазонов, в которых требуются мощные источники излучения.

Практическая значимость исследования заключается в том, что:

- расширение спектрального состава излучения СО лазера при использовании нелинейных кристаллов позволяет более эффективно использовать СО лазер в газовом анализе, спектроскопии и фотохимии;
- широкополосная СО лазерная система с преобразованием частоты, излучающая в диапазоне  $2.5\div8.3$  мкм более 670 спектральных линий, перекрывает несколько окон прозрачности атмосферы и может быть использована для создания многофункционального лидара, а также для специальных применений;
- высокоэффективное преобразование частоты наносекундных импульсов излучения СО лазера позволяет получить мощное селективное излучение в диапазоне длин волн  $2.5\div8.3$  мкм;
- генерация второй гармоники основной полосы излучения СО лазера при преобразовании частоты излучения в нелинейных кристаллах становится эффективнее СО лазера, работающего на первом обертоне молекулы СО.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.** Результаты, полученные в диссертации, могут быть

использованы предприятиями, занимающимися созданием систем контроля природной среды путем лазерного зондирования атмосферы, многокомпонентных газовых смесей, колебательно- и электронно-возбужденных неравновесных газовых сред, низкотемпературной плазмы, управлением химическими реакциями путем селективного фотовоздействия, разделением изотопов и другими специальными применениями, такими как ПАО «НПО «Алмаз» (г. Москва), АО КБХА (г. Воронеж), АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» (г. Москва, г. Троицк), АО «НИИЭФА» (г. С.-Петербург) и др.

Таким образом, на основе глубокого анализа области исследований, верной постановки проблемы исследования в целом и конкретных задач исследования, применения современных методов исследований получены обоснованные и достоверные результаты.

#### **Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации.**

Отмечая научную и практическую значимость работы, высокую степень обоснованности и достоверности ее основных результатов, следует также указать на некоторые недостатки, присущие диссертации.

- 1) В диссертации и автореферате не указана расходимость лазерного излучения, как СО лазера низкого давления с накачкой разрядом постоянного тока и модуляцией добротности резонатора, так и СО лазерной системы «задающий генератор – усилитель», излучающей микросекундный и миллисекундный цуг наносекундных импульсов.
- 2) В диссертации и автореферате не указан также модовый состав (количество поперечных мод) излучения СО лазерных систем, используемых при проведении исследований.

3) В диссертации местами встречаются стилистические неточности, связанные с повтором ввода аббревиатуры (например, стр.17) исходного словосочетания, повтором слов в предложении (например, стр.35), некоторой небрежности в оформлении подписей к рисункам (например, рис.2.9, стр.44; рис.2.10, стр. 45) и др.

4) Автореферат диссертации выполнен в соответствии с правилами оформления авторефератов и не содержит каких-либо существенных стилистических неточностей.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не влияют на положительную общую оценку диссертационной работы И.О. Киняевского.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней».**  
Диссертационная работа И.О. Киняевского выполнена на актуальную тему, представляет собой законченную научную работу, имеет теоретическую и практическую значимость.

Основные результаты исследований изложены в 13 научных работах (одиннадцать работ опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ), обсуждены научной общественностью и получили положительную оценку.

Автореферат и опубликованные работы соискателя отражают основное содержание диссертации.

Таким образом, диссертация И.О. Киняевского является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, которая представляет собой исследование актуальной проблемы, характеризуется научной новизной, теоретической и практической значимостью, и в которой содержится решение задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, **отвечает требованиям п.9, п.10, п.11, п.13, п.14 «Положения о присуждении ученых степеней»**, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук,

а ее автор, Киняевский Игорь Олегович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 Лазерная физика.

Начальник лаборатории  
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

*Кузьмин* —

В.Н. Кузьмин

Подпись В.Н. Кузьмина заверяю:

Ученый секретарь АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,

к.ф.-м.н.

А.А. Ежов

«25» сентября 2015 г.



Кузьмин Виктор Николаевич

142190, г. Москва, г. Троицк, ул. Школьная, д.11, кв.15.

Телефон: +74958510518.

Адрес электронной почты: [vnkuzmin@triniti.ru](mailto:vnkuzmin@triniti.ru).

Место работы: Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований».

Должность: начальник лаборатории отдела мощных лазеров.

## Список

публикаций официального оппонента Кузьмина Виктора Николаевича, опубликованных за последние пять лет по теме диссертации Киняевского Игоря Олеговича «Генерация второй гармоники, суммарных и разностных частот излучения лазера на окиси углерода в кристаллах ZnGeP<sub>2</sub> и GaSe», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 Лазерная физика.

1. Гурашвили В.А., Дроздов П.А., Кузьмин В.Н. и др. Результаты исследования оптического качества активной среды мощного сверхзвукового СО-лазера // Вестник ВКО. 2011. № 01. С. 99÷102.
2. Баранов Г.А., Гурашвили В.А., Кузьмин В.Н. и др. Широкоапertureный ускоритель непрерывного действия с выводом электронного пучка высокой плотности // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 1. С. 81-85.
3. Гурашвили В.А., Кузьмин В.Н., Полтанов А.Е. и др. Испытания макета первичного источника электропитания ГРК на основе аккумуляторных батарей на макете СОЛ-0.5 // Отчет ГНЦ РФ ТРИНИТИ № 10/НИР-7019. -М. 2015. 28 стр.

Официальный оппонент,  
начальник лаборатории  
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

В.Н. Кузьмин

Подпись В.Н. Кузьмина заверяю:

Ученый секретарь АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,  
к.ф.-м.н.

«25» сентября 2015 г.

А.А. Ежов

