

КОНВЕРСИЯ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ЩЕЛЕВЫХ СО- И СО₂-ЛАЗЕРОВ С НАКАЧКОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ГАЗОВЫМ РАЗРЯДОМ В СПЕКТРАЛЬНЫЙ ДИАПАЗОН ~2—20 мкм (Обзор)

А. А. Ионин, И. О. Киняевский, Ю. М. Климачев, А. Ю. Козлов,
А. А. Котков, О. А. Рулев, А. М. Сагитова*, Л. В. Селезнев, Д. В. Синицын

УДК 621.375.826;548.0

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-4-443-454>

Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской АН,
Москва, Россия; e-mail: sagitovaam@lebedev.ru

(Поступила 23 мая 2022)

Приведен обзор работ, которые инициировали и обеспечили создание гибридной ИК-лазерной системы, основанной на преобразовании в различных нелинейных кристаллах излучения щелевых СО- и СО₂-лазеров с накачкой высокочастотным газовым разрядом и модуляцией добротности резонатора. Разработанная широкополосная лазерная система действует в спектральном диапазоне от ~2 до ~20 мкм за счет генерации в этих кристаллах излучения на разностных и суммарных частотах.

Ключевые слова: преобразование частоты излучения в нелинейных кристаллах, щелевые СО- и СО₂-лазеры, высокочастотный газовый разряд, модуляция добротности резонатора.

A review of researches that both initiated and provided development of a hybrid IR laser system based on conversion of Q-switched radio-frequency discharge slab CO and CO₂ lasers in various nonlinear crystals is presented. The broadband laser system developed operates in the spectral range from ~2 to ~20 μm due to generation of emission on difference and sum frequencies in these crystals.

Keywords: frequency conversion in nonlinear crystals, slab CO and CO₂ lasers, radio-frequency electric discharge, Q-switching.

Содержание

Введение.

Исследования по конверсии частоты излучения СО- и СО₂-лазеров.

Разработка широкополосной лазерной системы на базе щелевых СО- и СО₂-лазеров и нелинейных кристаллов.

Внутрирезонаторная генерация суммарных частот СО-лазера в кристаллах BaGa₂GeSe₆ и ZnGeP₂ (2.45—2.95 мкм).

Генерация третьей гармоники излучения СО-лазера (1.7—1.9 мкм).

Генерация излучения в длинноволновой области (12.0—19.3 мкм).

Возможности коммерческой реализации.

Заключение.

FREQUENCY CONVERSION OF RADIO-FREQUENCY ELECTRIC DISCHARGE SLAB CO AND CO₂ LASERS INTO THE SPECTRAL RANGE OF ~2—20 μm (Review)

A. A. Ionin, I. O. Kinyayevsky, Yu. M. Klimachev, A. Yu. Kozlov, A. A. Kotkov, O. A. Rulev, A. M. Sagitova*, L. V. Seleznev, D. V. Sinitsyn (P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: sagitovaam@lebedev.ru)

* Автор, с которым следует вести переписку.

Введение. Когерентные источники излучения среднего ИК-диапазона представляют большой интерес для широкого круга научных и технологических приложений от спектроскопии и метрологии до информационных технологий, управления производственными процессами, фотохимии, фотобиологии и фотомедицины. Средний ИК-диапазон в интервале от ~ 2 до ~ 20 мкм часто называют областью “отпечатков пальцев” (molecular-fingerprint mid-infrared (2—20 μm) region) [1], потому что большинство молекул имеют в нем сильные основные колебательные полосы поглощения. Данный диапазон включает в себя как окна прозрачности атмосферы (например, 3—5 и 8—14 мкм, рис. 1), так и сильные линии различных атмосферных молекулярных газов, токсичных и взрывчатых веществ, загрязнителей воздуха, воды и почвы, компонентов дыхания и т. д. [2]. Лазеры среднего ИК-диапазона полезны также для медицинских приложений [3], в частности, для подавления патогенных бактерий [4]. Поэтому во всем мире активно разрабатываются различные типы лазеров среднего ИК-диапазона для научных, производственных и медицинских приложений.

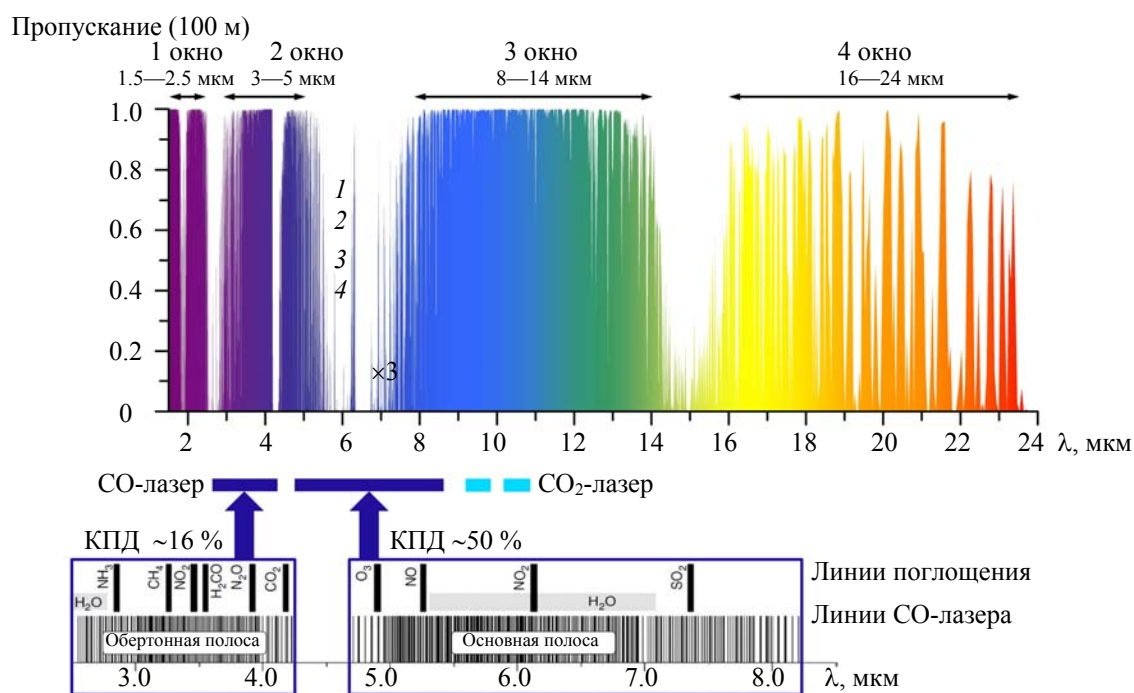


Рис. 1. Окна прозрачности атмосферы, диапазоны излучения СО- и СО₂-лазеров и линии поглощения некоторых веществ

Значительный прогресс достигнут в разработке различных типов твердотельных лазеров среднего ИК-диапазона [2]. В частности, импульсные лазеры среднего ИК-диапазона на основе кристаллов халькогенидов (например, ZnSe, ZnS, CdSe, CdZnTe), легированных железом, перестраиваются в диапазоне ~ 2 —5 мкм с энергией импульса > 1 Дж. Волоконные лазеры и оптические параметрические генераторы также успешно работают в коротковолновой части среднего ИК-диапазона до ~ 5 мкм. Разнообразие лазеров, работающих в среднем ИК-диапазоне на длинах волн от 5 до 12 мкм, значительно меньше. В этой области достигнут прогресс в разработке коммерчески доступных квантово-каскадных лазеров [2] (например, приборы Hamamatsu Photonics, Thorlabs). Квантово-каскадные лазеры компактны, существуют варианты с большим диапазоном перестройки, однако их выходная мощность невысока по сравнению с газовыми лазерами. Также разработан ряд лазерных устройств на основе параметрических генераторов света, совмещенных с генерацией разностной частоты (ГРЧ) в дополнительном кристалле [2]. Тем не менее лазеров, генерирующих в длинноволновой области (12—20 мкм) среднего ИК-диапазона, недостаточно. В данном диапазоне работают несколько квантово-каскадных лазеров — на базе гетероструктуры на основе Sb или системы InGaAs/AlInAs [5]. Их длинноволновая генерация ограничена фоновыми полосами поглощения материалов.

В настоящем обзоре представлены работы, которые инициировали и обеспечили создание в лаборатории газовых лазеров Центра лазерных и нелинейно оптических технологий отделения квантовой радиофизики им. Н. Г. Басова ФИАН гибридной ИК-лазерной системы, основанной на преобразовании в различных нелинейных кристаллах излучения щелевых СО- и СО₂-лазеров с накачкой высокочастотным (ВЧ) газовым разрядом и модуляцией добротности резонатора. СО-лазер может работать на сотнях узких спектральных линий как основной полосы генерации от 4.7 мкм [6] до 8.7 мкм [7] с КПД до 50 % [6], так и оберточной (2.5—4.2 мкм) [8] с КПД до 16 % [9]. СО₂-лазер может работать на десятках узких линий в интервале 9—11 мкм [10]. Разработанная широкополосная лазерная система за счет генерации разностных и суммарных частот в различных нелинейных кристаллах действует в спектральном диапазоне ~2—20 мкм.

Исследования по конверсии частоты излучения СО- и СО₂-лазеров. Преобразованием частоты излучения в нелинейных кристаллах можно значительно расширить возможности данных лазеров для решения различных задач лазерной физики. При этом выбор нелинейного кристалла для конкретного применения определяется некоторыми его свойствами: прозрачностью в рабочем спектральном диапазоне, адекватным двулучепреломлением для фазового синхронизма, высоким коэффициентом нелинейности, высоким порогом оптического разрушения и др. Поэтому выбор наиболее эффективного кристалла для конкретной лазерной системы является сложной задачей и часто требует масштабных вычислений (см., например, [11]).

В работе [11] проверялся интегральный критерий FOM (figure of merit), позволяющий оценить эффективность нелинейных кристаллов. Исследование проводилось на основе экспериментальных данных по широкополосной генерации суммарных частот излучения СО-лазера в нелинейных кристаллах среднего ИК-диапазона: известных ZnGeP₂ (ZGP), AgGaSe₂ (AGSe), GaSe и новых BaGa₂GeSe₆ (BGGSe) и PbIn₆Te₁₀ (PIT). Расчеты проводились при схожих условиях генерации лазера и интенсивности излучения на каждом из кристаллов, близком к порогу оптического разрушения. Показано, что интегральный критерий, учитывающий нелинейный коэффициент, показатель преломления кристалла, спектральную и угловую ширину фазового синхронизма, может быть использован не только для качественной, но и для количественной оценки эффективности нелинейных кристаллов. В [12] с помощью интегрального критерия оценивалась эффективность преобразования следующих кристаллов: AgGaS₂ (AGS), AGSe, BGGSe, CdSe, CdSiP₂ (CSP), GaSe, HgGa₂S₄ (HGS), PIT, ZGP. Для генерации широкополосной второй гармоники кристалл ZGP должен быть наиболее эффективным для излучения накачки в диапазоне 5.5—7.7 мкм (максимальная ширина фазового синхронизма $\Delta\lambda = 0.886$ мкм). Для генерации длинноволнового излучения кристаллы CSP и HGS должны обеспечивать более высокую эффективность, в то время как для генерации излучения с меньшей длиной волны должны быть наиболее эффективными кристаллы CSP, BGGSe и HGS.

Экспериментальные исследования преобразования частоты излучения СО-лазера в различных нелинейных кристаллах проводились и ранее. Исследованию преобразования частоты излучения СО-лазера в кристалле GaSe посвящена работа [13], где СО-лазер работал на $\lambda = 5.3$ мкм, измерены углы фазового синхронизма генерации второй гармоники (ГВГ), однако энергетические характеристики излучения второй гармоники не приведены.

В работе [14] сообщается о ГВГ излучения непрерывного СО-лазера в кристалле AGSe с длиной волны, перестраиваемой от 5.2 до 6.0 мкм. Измеренные углы фазового синхронизма для ГВГ по I типу составили от 42.2 до 40.25°. В [15] получена ГВГ излучения непрерывного СО-лазера в кристалле ZGP в область 2.3—3.1 мкм. Выходная мощность непрерывного СО-лазера 8.5 Вт, ~70 % мощности приходилось на восемь сильных линий излучения. Мощность преобразованного излучения 0.2—1.1 мВт, эффективность преобразования 0.01 %. Осуществлена ГВГ на отдельной линии, выделенной с помощью дифракционной решетки. При мощности излучения накачки 0.8 Вт мощность излучения второй гармоники 2 мВт.

В работе [16] осуществлена ГВГ излучения СО-лазера ИЛГН-706 в кристалле ZGP с мощностью 4.7 Вт. Выходная средняя мощность излучения второй гармоники ~1 мВт, что соответствует эффективности ~0.2 %. Также измерены углы и угловая ширина фазового синхронизма преобразования частоты излучения СО-лазера и представлены результаты генерации суммарных частот (ГСЧ) в кристалле ZGP при нелинейном смешении излучения этого лазера с излучением СО₂-лазера ИЛГН-704 с мощностью 5.7 Вт. Мощность ГСЧ ~0.6 мВт. Спектральный состав ГСЧ в данной работе не измерялся.

С точки зрения возможности увеличения мощности излучения накачки кристалла значительно эффективнее использование СО-лазера с модуляцией добротности резонатора (МДР), которая

не только увеличивает пиковые мощности, но и по сравнению с режимом свободной генерации значительно расширяет спектр генерации [17]. Уменьшение средней мощности излучения в режиме МДР приводит к уменьшению нагрева кристалла и увеличению его стойкости к разрушению.

Удвоение частоты излучения СО-лазера с МДР исследовано в [18, 19]. В [18] по сравнению с [16] использован более качественный образец кристалла ZGP (коэффициент поглощения 0.1 см^{-1} в области 3—8 мкм). Режим МДР СО-лазера осуществлен с помощью вращающегося зеркала, помещенного внутрь резонатора. Частота модуляции изменялась в интервале 10—200 Гц, средняя мощность излучения 60—250 мВт, пиковая мощность 350—500 Вт. Максимальная средняя мощность второй гармоники 4 мВт при мощности излучения накачки 194 мВт и частоте модуляции 89 Гц. Максимальный коэффициент преобразования излучения во вторую гармонику $\sim 3 \%$.

В работе [19] использован аналогичный лазеру [18] СО-лазер с МДР и охлаждением проточной водой ($T \sim 10^\circ\text{C}$), генерирующий на 80 линиях при частоте модуляции 10—200 Гц. В качестве нелинейной среды использован тот же, что и в [18], непросветленный кристалл ZGP длиной 12 мм. Внешняя эффективность преобразования излучения 4.9 % соответствует внутренней эффективности $\sim 10 \%$. Спектр преобразованного излучения >200 линий в области 2.6—3.2 мкм. Средняя мощность второй гармоники 8.8 мВт при средней мощности накачки 180 мВт.

CdGeAs_2 обладает одним из самых высоких коэффициентов нелинейности второго порядка, однако кристаллы этого материала хорошего оптического качества трудно выращивать. Несмотря на это, кристалл CdGeAs_2 использован в исследованиях ГРЧ излучения СО- и CO_2 -лазеров в интервале 15.6—16.5 мкм [20, 21]. Работы [20, 21], по-видимому, направлены на создание лазерного источника для разделения изотопов урана, который должен работать на $\lambda = 16$ мкм. Однако использование метода ГРЧ СО- и CO_2 -лазера как источника 16-мкм излучения на тот момент не получила своего развития по ряду причин, которые рассмотрены в [22]. В частности, отмечено, что основная проблема получения высокой эффективности преобразования связана со сложностью осуществления оптимального временного перекрытия импульсов накачки (по результатам [21]). Кроме того, для реализации эффективного 16-мкм источника необходимы разработки новых СО-лазеров, излучающих короткие (наносекундные) мощные импульсы, и соответствующих нелинейных кристаллов большого размера с высоким оптическим качеством.

Первые работы по преобразованию излучения молекулярных лазеров в нелинейных кристаллах, проведенные в лаборатории газовых лазеров ФИАН, рассмотрены в обзорных публикациях [23, 24]. Отметим основные полученные результаты.

Продемонстрировано двухкаскадное преобразование излучения СО-лазера в одном образце нелинейного кристалла ZGP. СО-лазер работал на ~ 150 колебательно-вращательных переходах в диапазоне длин волн 5.0—7.5 мкм. В первом каскаде преобразования за счет ГВГ и ГСЧ различных пар линий излучения СО-лазера зарегистрировано ~ 350 линий в диапазоне 2.5—3.7 мкм. Во втором каскаде путем смешения излучения, полученного в первом каскаде, и остаточного излучения СО-лазера зарегистрировано ~ 90 линий в интервале 4.3—5.0 мкм и более 80 линий в интервале 7.5—8.3 мкм. В итоге данная лазерная система излучала ~ 670 линий в диапазоне 2.5—8.3 мкм [25].

Рекордная эффективность преобразования при ГВГ достигнута за счет использования СО-лазерной системы задающий генератор—лазерный усилитель на основе широкоапертурной криогенной электроионизационной установки, в которой задающий генератор работает в режиме активной синхронизации мод. В данной системе получен микросекундный цуг наносекундных импульсов с пиковой мощностью до 100 кВт и длительностью ~ 10 нс [26]. Внутренняя эффективность преобразования излучения СО-лазера в 17-мм нелинейном кристалле ZGP при этом $\sim 37 \%$ (длина волны накачки $\lambda = 5.191$ мкм), а в 6-мм кристалле GaSe 5 %.

Осуществлено преобразование в нелинейных кристаллах излучения СО- и CO_2 -лазеров с синхронной МДР в диапазоне 3.25—16.6 мкм. При ГСЧ в GaSe зарегистрирован спектр в диапазоне 3.25—3.8 мкм, а при ГРЧ 11.5—13 мкм [23, 27]. В кристалле AGS спектр ГРЧ излучения СО- и CO_2 -лазеров наблюдается на длинах волн от 12 до 16.6 мкм в зависимости от угла фазового синхронизма [23, 27]. Необходимо отметить, что эффективность преобразования излучения с понижением частоты (в частности ГРЧ) ограничена энергетическими соотношениями Мэнли—Роу [28] между приращенными мощностями взаимодействующих волн и их частотами. При этом чем больше частота накачки, тем большая мощность требуется для получения одной и той же мощности ГРЧ. Поэтому для ГРЧ излучения СО- и CO_2 -лазеров в диапазон ~ 12 —20 мкм требуется мощность излучения накачки в несколько раз меньше, чем для ГРЧ излучения лазеров ближнего ИК-диапазона. При этом подобрать

нелинейные кристаллы с хорошим пропусканием как в ближнем, так и в дальнем ИК-диапазоне достаточно сложно.

Первым фактором развития широкополосного преобразования излучения среднего ИК-диапазона является недавний прогресс в разработке СО₂- и СО-лазеров с накачкой щелевым ВЧ газовым разрядом. Их конструкция обеспечивает компактность, они имеют низковольтный источник питания и аналогичный или больший уровень мощности по сравнению с газовыми лазерами постоянного тока. В лаборатории газовых лазеров Центра лазерных и нелинейно-оптических технологий отделения квантовой радиофизики им. Н. Г. Басова ФИАН создана компактная лазерная установка на основе щелевого ВЧ СО-лазера, излучающего в режиме МДР ~90 линий в диапазоне длин волн основной полосы ($\lambda = 5.0\text{—}6.6$ мкм) [29], на которой с помощью внрезонаторного преобразования в нелинейном кристалле ZGP получено >200 линий суммарных частот ($\lambda = 2.5\text{—}3.2$ мкм) [30]. При пиковой мощности излучения СО-лазера ~2.5 кВт эффективность преобразования внутри кристалла ~8 %.

Второй фактор, обуславливающий интерес к этому способу преобразования частоты, — прогресс в кристаллах среднего ИК-диапазона. Разработано несколько новых типов нелинейных кристаллов — РТ [31], BGGSe [32], BaGa₂GeS₆ [32] и др. Также для преобразования излучения в среднем ИК-диапазоне используются AgGaSe₂, AgGaS₂, ZnGeP₂ и GaSe [33].

Среди квантово-каскадных лазеров как наиболее массово используемых источников в спектроскопии для области 3—20 мкм существуют варианты с большим диапазоном перестройки, например 5.3—12.8 мкм, с шагом 2 см⁻¹ и пиковой мощностью до 150 мВт [34]. Однако в данном обзоре рассматривается другой вариант импульсно-периодического лазера: с изначально многочастотным излучением до 120 Вт в одной линии из ~150 линий для $\lambda \sim 5\text{—}7$ мкм и до 10 линий для $\lambda \sim 9\text{—}10$ мкм. Для диапазона суммарных частот ($\lambda \sim 2.5\text{—}3$ мкм) количество линий намного больше: от ~350 [25] до ~600 линий [35] с пиковой мощностью до 5 Вт.

Разработка широкополосной лазерной системы на базе щелевых СО- и СО₂-лазеров и нелинейных кристаллов. Внутррезонаторная генерация суммарных частот СО-лазера в кристаллах BGGSe и ZGP (2.45—2.95 мкм). Создана лазерная система, одновременно работающая в двух спектральных диапазонах: основной полосе СО-лазера (4.9—6.0 мкм) и полосе его суммарных частот (2.5—3.0 мкм). Использован импульсно-периодический многочастотный СО-лазер с ВЧ-накачкой, работающий в режиме МДР. Преобразование частоты осуществлялось внутри резонатора в новом нелинейном кристалле BGGSe [36]. Схема экспериментов представлена на рис. 2.

Рассматривались различные конфигурации резонатора лазера, причем в одной из них нелинейный кристалл использован и как выходное зеркало, а в других в дополнение к кристаллу BGGSe ($T \sim 70$ %, $\lambda = 2.5\text{—}6.0$ мкм) использована или пластина из германия Ge ($T \sim 50$ %, $\lambda = 2.5\text{—}6.0$ мкм), или интерференционное зеркало от лазера ИЛГН-706 ($T \sim 50$ %, $\lambda = 2.5\text{—}3.0$ мкм; $T \sim 10$ %, $\lambda = 4.8\text{—}6.0$ мкм) (рис. 3). При выходном зеркале (кристалле ZGP) пиковая мощность лазерных импульсов основной частоты 2 кВт. Использование выходных зеркал с более высоким коэффициентом отражения для основной полосы излучения СО-лазера приводит к возрастанию мощности излучения ГСЧ (пиковая мощность 10 Вт), количества спектральных линий (до 170) и ширины спектра [36] (рис. 4).

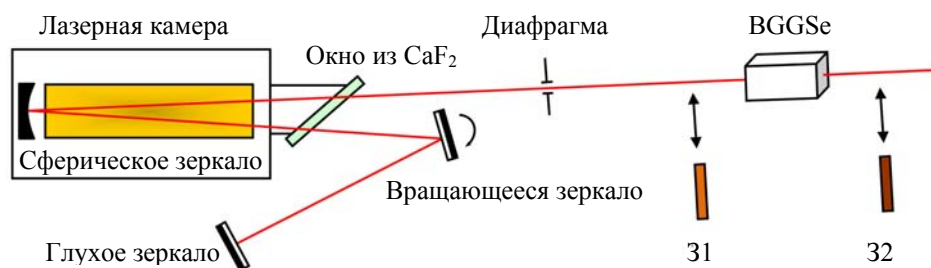


Рис. 2. Схема экспериментов по внутррезонаторному преобразованию излучения СО-лазера в нелинейном кристалле BGGSe [36]

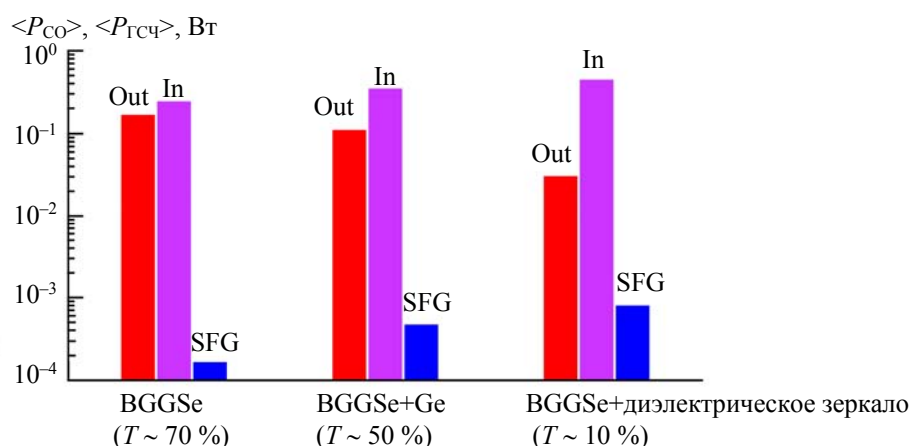


Рис. 3. Средняя мощность излучения на выходе из резонатора (Out), внутри резонатора (In) и генерации суммарных частот (SFG) для резонаторов R1, R2 и R3 конфигурации [36]

Получена внутрирезонаторная ГСЧ в кристалле ZGP [37, 38] — “стандарте” нелинейных кристаллов среднего ИК-диапазона. Схема эксперимента та же, что и в [36], только вместо кристалла BGGSe использован кристалл ZGP, выращенный в лаборатории оптических кристаллов (г. Томск). Отношение мощностей выходящего из резонатора излучения на суммарных частотах и частотах СО-лазера на $\sim 16\%$ выше по сравнению с результатами, полученными с кристаллом BGGSe (11.5%) на той же лазерной установке [39].

Несмотря на то что нынешняя система СО-лазера дает в ~ 2.8 раза меньший КПД при внутрирезонаторном преобразовании по сравнению с внерезонаторным (8.2%) [30], у нее большие перспективы для совершенствования. Как правило, эффективность ГСЧ ограничивается оптическим повреждением поверхности кристалла. Расчеты показывают, что масштабирование мощности системы СО-лазера с целью достижения интенсивности излучения внутри резонатора, близкой к порогу оптического повреждения кристалла ZGP, позволяет достичь эффективности внутрирезонаторного преобразования $\sim 80\%$. Если интенсивность внутри резонатора на кристалле меньше порога оптического повреждения, но больше, чем в нашем случае, за счет дополнительной фокусировки, как в [40], например 10 МВт/см^2 , то эффективность внутрирезонаторного преобразования может составить $\sim 25\%$.

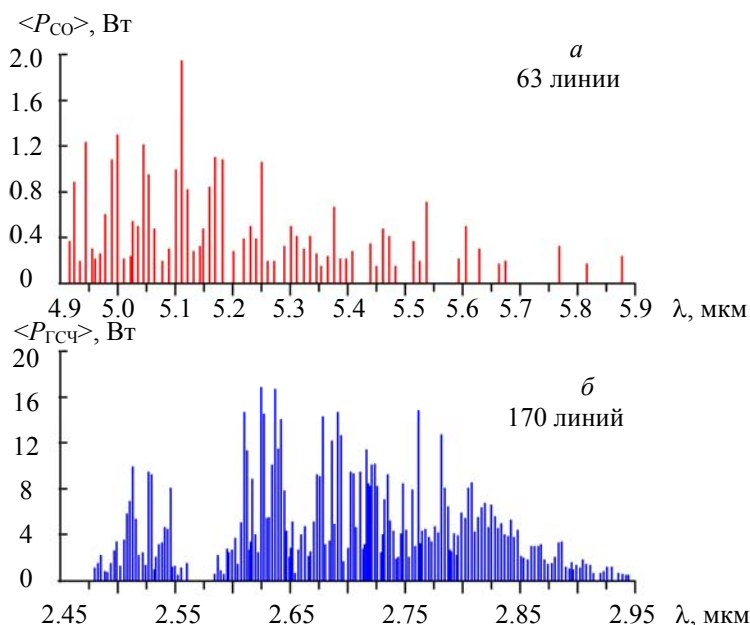
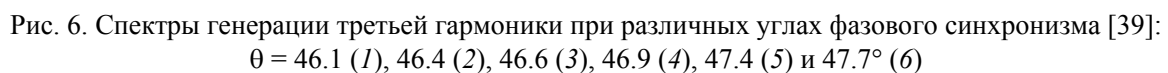
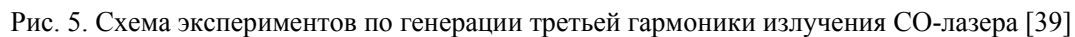


Рис. 4. Спектры СО-лазера (а) и ГСЧ (б) для конфигурации резонатора с зеркалом с $T \sim 10\%$ для $\lambda = 4.8\text{--}6.0 \text{ мкм}$ [36]

Для достижения максимальной мощности ГТГ в качестве выходного зеркала использована Ge-пластина. Кроме того, имеется возможность изменять полярный (θ) и азимутальный (ϕ) углы во втором образце нелинейного кристалла, расположенном вне резонатора. Спектр полученного излучения находится в диапазоне 1.7—1.9 мкм, мощность 0.5 Вт (см. рис. 6), что соответствует эффективности 0.01 %. При этом пиковая мощность основного излучения СО-лазера, его второй и третьей гармоник 4.7 кВт, 100 и 0.5 Вт соответственно [39].



Генерация излучения в длинноволновой области (12.0—19.3 мкм). Излучение в длинноволновой области (~12.0—19.3 мкм) получено путем ГРЧ при смешении излучения импульсно-периодических щелевых СО- и СО₂-лазеров с ВЧ-накачкой в нелинейных кристаллах AGSe, BGGSe или PIT. Данные кристаллы изготовлены в лаборатории новейших технологий Кубанского государственного университета. Схема эксперимента представлена на рис. 7.

Оба лазера работали в режиме МДР за счет общего вращающегося зеркала. Генерация оптимизирована таким образом, что импульсы СО- и СО₂-лазеров перекрывались по времени. Пространственное перекрытие обеспечено с помощью поляризатора, пропускающего излучение СО₂-лазера и отражающего излучение СО-лазера. Фильтр Sp-5665 служил для того, чтобы избавиться от излучения переходов на низких колебательных полосах (с меньшей длиной волны), которые не нужны для ГРЧ в длинноволновую область. Использование фильтра позволило также повысить интенсивность оставшегося излучения до значений, близких к оптическому порогу разрушения кристалла. Таким образом, совмещенные по времени и пространству импульсы СО- и СО₂-лазеров направлялись в нелинейный кристалл.

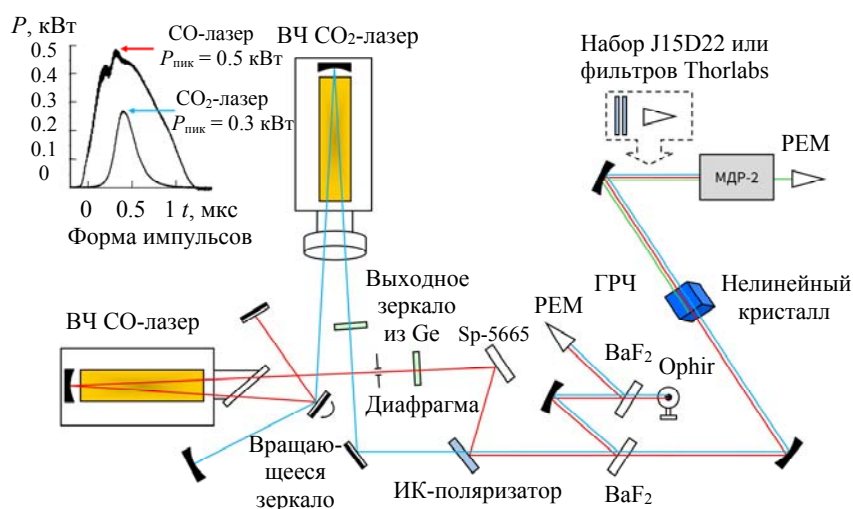


Рис. 7. Схема экспериментов по генерации излучения в длинноволновой области (~12—19.3 мкм) [42]

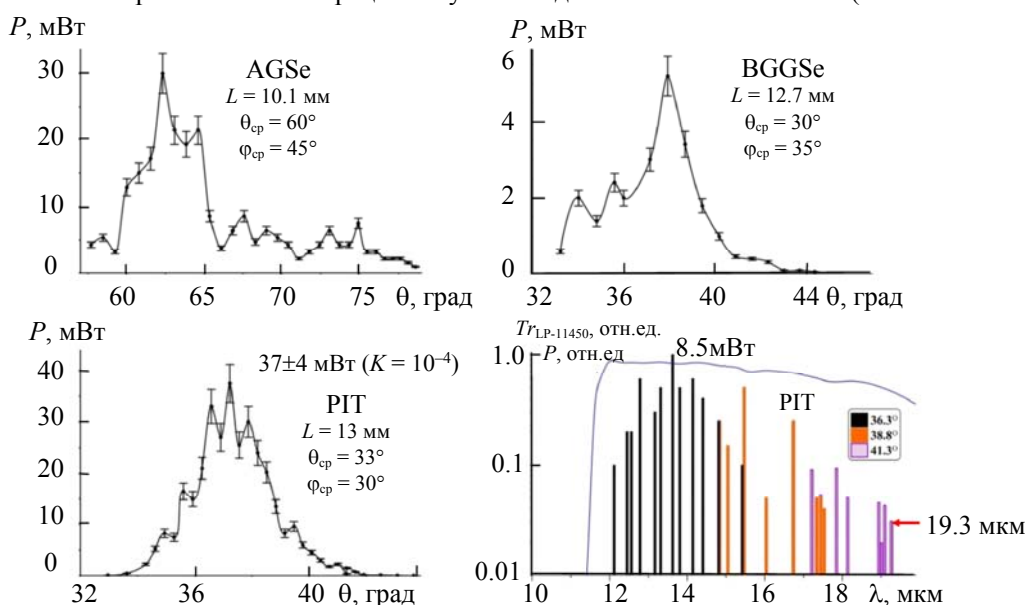


Рис. 8. Зависимость пиковой мощности преобразованного излучения для AGSe, BGGSe и PIT от угла фазового синхронизма θ , спектр преобразованного излучения для PIT при $\theta = 36.3, 38.8$ и 41.3° , пропускание Tr оптического фильтра LP-11450, указаны длины L и углы среза $\theta_{\text{ср}}, \varphi_{\text{ср}}$ [42]

СО₂-лазер излучал на четырех спектральных линиях в диапазоне 9.2—9.6 мкм. Пиковая мощность излучения 0.3 кВт, максимальная мощность излучения на отдельно взятой спектральной линии 250 Вт. Отфильтрованный спектр СО-лазера насчитывал 30 линий в диапазоне 5.4—6.4 мкм. Пиковая мощность излучения 0.5 кВт, максимальная мощность излучения на отдельно взятой линии 67 Вт. Излучение накачки отрезалось после кристалла оптическими фильтрами (в частности, LP-11450). Для указанных выше кристаллов исследована эффективность преобразования частоты излучения в область ~12.0—19.3 мкм среднего ИК-диапазона (рис. 8). Максимальная мощность преобразованного излучения 37 мВт получена для кристалла РИТ с пиковой мощностью в линии до 8.5 мВт, что соответствует внутренней эффективности преобразования 10^{-4} [42].

Таким образом, создана широкополосная лазерная система на базе целевых СО/СО₂-лазеров с ВЧ-накачкой и модуляцией добротности резонатора в сочетании с нелинейными кристаллами. Данная широкополосная лазерная система за счет преобразования частоты различными кристаллами действует в диапазоне ~2—20 мкм (рис. 9).

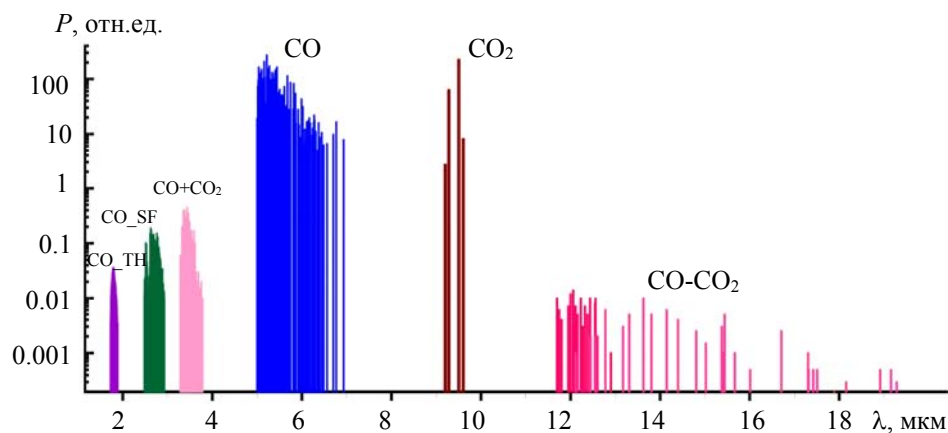


Рис. 9. Спектры генерации гибридной молекулярной газовой лазерной системы, работающей в диапазоне длин волн ~2—20 мкм [43]

Возможности коммерческой реализации. Описанные выше результаты получены в лабораторных условиях. Возникает вопрос, можно ли их существенно улучшить благодаря современным достижениям в развитии промышленных лазерных технологий. Для практических применений необходимы надежные компактные варианты СО- и СО₂-лазеров с ВЧ-накачкой, проверенные временем при использовании в налаженном промышленном производстве. Для СО-лазеров желательно не использовать криогенное охлаждение активной среды жидким азотом. Анализируя научную литературу по данной теме, отмечаем, что СО- и СО₂-лазеры с ВЧ-накачкой уже активно используются для промышленной резки различных стекол и не только по прямой линии, сверления отверстий, разметки керамики, трехмерной печати на стекле [44, 45]. В работе [46] показано, что СО-лазер, работающий на длине волны 5—6 мкм, играет важную роль в производстве микроэлектроники, а также для сверления и отслаивания керамических пластин. В [47, 48] представлена управляемая компьютером лазерная система для изготовления новых специализированных кремниевых оптических волокон с помощью СО-лазера. Обнаружено, что СО-лазеры улучшают равномерность температуры и время нагрева вращающейся трубчатой заготовки при минимизации поверхностного испарения и диффузии загрязняющих веществ в данных волокнах.

В цитируемых работах использовались СО- и СО₂-лазеры с ВЧ-накачкой фирмы Coherent. При этом СО-лазер охлаждался водой, так как создан на базе хорошо отработанного в техническом плане СО₂-лазера путем замены газовой смеси. С увеличением объема активной среды средние мощности СО- и СО₂-лазеров сравниваются [44]. Что касается массогабаритных характеристик, то, например, модель Diamond J-3-5 со средней мощностью 330 Вт весит 45 кг при габаритах 1064×198×228 мм. Решен вопрос и с МДР в СО₂-лазерах с ВЧ-накачкой путем использования акустооптического модулятора для получения длительности импульсов ~200 нс [49].

Для промышленных применений щелевые CO₂-лазеры с ВЧ-накачкой производятся на предприятии ЗАО “Российские лазерные системы” (средняя мощность излучения от 100 Вт до 4 кВт [50]), щелевые CO₂-лазеры с ВЧ-накачкой со средней мощностью <50 Вт — ООО “Специальные технологии” [51] и АО “Плазма” [52]. Щелевые СО-лазеры с ВЧ-накачкой в настоящее время в России не производятся. Однако опыт работы Coherent показывает, что такой лазер может быть реализован на базе хорошо отработанного в техническом плане щелевого CO₂-лазера путем замены газовой смеси. Что касается нелинейных кристаллов, все применяемые ИК-кристаллы коммерчески доступны и изготовлены в российских организациях — Кубанском государственном университете [53], ООО “Лаботория оптических кристаллов” [54] и др.

Закключение. Рассмотрен способ охвата среднего ИК-диапазона от ~2 до ~20 мкм с помощью молекулярных газовых лазеров и преобразования частоты их излучения в нелинейных кристаллах. Для этого была разработана оригинальная лазерная система на основе многочастотных щелевых СО- и CO₂-лазеров с высокочастотной накачкой, работающих в режиме модуляции добротности резонатора. Микросекундные импульсы СО- и CO₂-лазеров объединены по времени и пространству и использованы для генерации суммарной и разностной частот. Экспериментально исследованы различные процессы преобразования частоты — генерация второй и третьей гармоник СО-лазера, генерация суммарной и разностной частоты СО- и CO₂-лазеров. Изучены различные нелинейные кристаллы и получены сотни узких спектральных линий в диапазоне 1.7—19.3 мкм. Разработанная лазерная система может найти применение в различных областях от многокомпонентного газового анализа [55] и диагностики плазмы [56] до биофотоники [4]. Однако каждое приложение требует углубленного изучения ее специфики, с учетом которой лазерную систему можно оптимизировать под конкретную задачу. Совершенствование лазерной системы возможно за счет использования высокочастотных СО- и CO₂-лазеров с одновременной модуляцией добротности резонатора акустооптическим модулятором.

Авторы выражают искреннюю благодарность Ю. М. Андрееву, В. В. Бадикову и Д. В. Бадикову за плодотворную совместную работу и предоставление нелинейных кристаллов.

Работы, выполненные в 2016—2020 гг., поддержаны Российским научным фондом (грант № 16-19-10619).

- [1] N. Picqué, T. W. Hänsch. *Nature Photon.*, **13**, N 3 (2019) 146—157
- [2] M. Ebrahim-Zadeh, I. T. Sorokina. *Mid-Infrared Coherent Sources and Applications*, Springer Netherlands, Dordrecht (2008)
- [3] V. A. Serebryakov, É. V. Boiko, N. N. Petrishchev, A. V. Yan. *J. Opt. Technol.*, **77**, N 1 (2010) 6—17
- [4] V. Kompanets, S. Shelygina, E. Tolordava, S. Kudryashov, I. Saraeva, A. Rupasov, O. Baitsaeva, R. Khmel'nitskii, A. Ionin, Y. Yushina, S. Chekalin, M. Kovalev. *Biomed. Opt. Express*, **12**, N 10 (2021) 6317—6325
- [5] K. Ohtani, M. Beck, J. Faist. *Appl. Phys. Lett.*, **105**, N 12 (2014) 121115
- [6] A. A. Ionin. In: *Gas Lasers*, Eds. M. Endo, R. F. Walter, Boca Raton, CRC Press (2007) 201—237
- [7] A. A. Ionin, I. O. Kinyaevskiy, Y. M. Klimachev, A. A. Kotkov, A. Y. Kozlov. *Opt. Lett.*, **42**, N 3 (2017) 498—501
- [8] A. A. Ionin, A. K. Kurnosov, A. P. Napartovich, L. V. Seleznev. *Laser Phys.*, **20** (2010) 144—186
- [9] A. A. Ionin, Y. M. Klimachev, A. Y. Kozlov, A. A. Kotkov, A. K. Kurnosov, A. P. Napartovich, O. A. Rulev, L. V. Seleznev, D. V. Sinitsyn, G. D. Hager, S. L. Shnyrev. *Quantum Electron.*, **36**, N 12 (2006) 1153—1154
- [10] S. Ya. Tochitsky, C. Sung, S. E. Trubnick, C. Joshi, K. L. Vodopyanov. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, N 9 (2007) 2509—2516
- [11] A. A. Ionin, I. O. Kinyaevskiy, A. M. Sagitova, Y. M. Andreev. *Appl. Opt.*, **58**, N 10 (2019) 2485—2489
- [12] A. A. Ionin, I. O. Kinyaevskiy, A. M. Sagitova. *Proc. 2020 Int. Conf. Laser Optics (ICLO)*, 2—6 November 2020, St. Petersburg, Russia, IEEE (2020) 290
- [13] Г. Б. Абдуллаев, Л. А. Кулевский, А. М. Прохоров, А. Д. Савельев, Е. Ю. Салаев, В. В. Смирнов. *Письма в ЖТФ*, **16**, N 3 (1972) 130—133
- [14] H. Kildal, J. C. Mikkelsen. *Opt. Commun.*, **9**, N 3 (1973) 315—318

- [15] Y. M. Andreev, T. V. Vedernikova, A. A. Betin, V. G. Voevodin, A. I. Gribenyukov, O. Y. Zyryanov, I. I. Ippolitov, V. I. Masychev, O. V. Mitropol'skiĭ, V. P. Novikov, M. A. Novikov, A. V. Sosnin. *Soviet J. Quantum Electron.*, **15**, N 7 (1985) 1014—1015
- [16] Y. M. Andreev, V. G. Voevodin, A. I. Gribenyukov, V. P. Novikov. *Soviet J. Quantum Electron.*, **17**, N 6 (1987) 748—749
- [17] I. V. Dubrovina, V. N. Ochkin, N. N. Sobolev. *Soviet J. Quantum Electron.*, **4**, N 8 (1975) 1028—1029
- [18] Y. M. Andreev, A. D. Belykh, V. G. Voevodin, P. P. Geĭko, A. I. Gribenyukov, V. A. Gurashvili, S. V. Izyumov. *Soviet J. Quantum Electron.*, **17**, N 4 (1987) 490—491
- [19] Ю. М. Андреев, С. Н. Говдей, П. П. Гейко, А. И. Грибенюков, В. А. Гурашвили, В. В. Зуев, С. В. Изюмов. *Опт. атм. и океана*, **1**, № 4 (1988) 124—126
- [20] H. Kildal, J. C. Mikkelsen. *Opt. Commun.*, **10**, N 4 (1974) 306—309
- [21] M. S. Piltch, J. P. Rink, C. R. Tallman. *Opt. Commun.*, **15**, N 1 (1975) 112—114
- [22] J. W. Kelly. In: *A Review of Laser Isotope Separation of Uranium Hexafluoride*, Ed. J. W. Kelly, Australian Atomic Energy Commission, Research Establishment, Lucas Heights [N.S.W.] (1983)
- [23] А. А. Ионин, И. О. Киняевский, Ю. М. Климачев, А. Ю. Козлов, А. А. Котков. *Ядерная физика и инжиниринг*, **7**, № 5 (2016) 383—390
- [24] А. А. Ионин, И. О. Киняевский, Ю. М. Климачев, А. А. Котков. *Опт. и спектр.*, **119**, № 3 (2015) 381—387
- [25] Ю. М. Андреев, А. А. Ионин, И. О. Киняевский, Ю. М. Климачев, А. Ю. Козлов, А. А. Котков, Г. В. Ланский, А. В. Шайдуко. *Квант. электрон.*, **43**, № 2 (2013) 139—143
- [26] Y. M. Andreev, O. V. Budilova, A. A. Ionin, I. O. Kinyaevskiy, Y. M. Klimachev, A. A. Kotkov, A. Y. Kozlov. *Opt. Lett.*, **40** (2015) 2997
- [27] O. V. Budilova, A. A. Ionin, I. O. Kinyaevskiy, Y. M. Klimachev, A. A. Kotkov, A. Y. Kozlov. *Opt. Commun.*, **363** (2016) 26—30
- [28] J. M. Manley, H. E. Rowe. *Proc. IRE*, **44**, N 7 (1956) 904—913
- [29] A. A. Ionin, I. O. Kinyaevskiy, Yu. M. Klimachev, A. Yu. Kozlov, O. A. Rulev, A. M. Sagitova, L. V. Seleznev, D. V. Sinitsyn. *Appl. Phys. B*, **124**, N 9 (2018) 173
- [30] A. A. Ionin, I. O. Kinyaevskiy, Y. M. Klimachev, Y. V. Kochetkov, A. Y. Kozlov, L. V. Seleznev, D. V. Sinitsyn, D. S. Zemtsov, Y. M. Andreev. *Laser Phys.*, **28**, N 2 (2018) 025401
- [31] S. Avanesov, V. Badikov, A. Tyazhev, D. Badikov, V. Panyutin, G. Marchev, G. Shevyrdyaeva, K. Mitin, F. Noack, P. Vinogradova, N. Schebetova, V. Petrov, A. Kwasniewski. *Opt. Mater. Express*, **1**, N 7 (2011) 1286—1291
- [32] V. V. Badikov, D. V. Badikov, V. B. Laptev, K. V. Mitin, G. S. Shevyrdyaeva, N. I. Shchebetova, V. Petrov. *Opt. Mater. Express*, **6**, N 9 (2016) 2933—2938
- [33] D. Nikogosyan. *Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey*, Springer, New York (2005)
- [34] А. В. Щербакова, Д. Р. Анфимов, И. Л. Фуфурин, И. С. Голяк, И. А. Трапезникова, Е. Р. Карева, А. Н. Морозов. *Опт. и спектр.*, **129**, № 6 (2021) 747—754
- [35] A. A. Ionin, I. O. Kinyaevskiy, Yu. M. Klimachev, A. M. Sagitova, Yu. M. Andreev. *Infrared Phys. Technol.*, **100** (2019) 62—66
- [36] A. A. Ionin, D. V. Badikov, V. V. Badikov, I. O. Kinyaevskiy, Y. M. Klimachev, A. A. Kotkov, A. Y. Kozlov, A. M. Sagitova, D. V. Sinitsyn. *Opt. Lett.*, **43**, N 18 (2018) 4358—4361
- [37] А. М. Сагитова, А. А. Ионин, И. О. Киняевский, Ю. М. Климачев, А. Ю. Козлов, А. А. Котков, Д. В. Синицын. *Сб. науч. тр. XXXI междунар. конф. “Лазеры в науке, технике, медицине”*, 28—30 октября 2020 г., Москва, МНТОРЭС им. А. С. Попова (2020) 49—53
- [38] A. A. Ionin, I. O. Kinyaevskiy, Yu. M. Klimachev, A. A. Kotkov, A. Yu. Kozlov, A. M. Sagitova, D. V. Sinitsyn, O. A. Rulev. *Opt. Laser Tech.*, **148** (2022) 107777
- [39] A. A. Ionin, I. O. Kinyaevskiy, Yu. M. Klimachev, A. A. Kotkov, A. Yu. Kozlov, A. M. Sagitova, D. V. Sinitsyn, V. V. Badikov, D. V. Badikov. *Opt. Laser Tech.*, **115** (2019) 205—209
- [40] V. O. Petukhov, V. A. Gorobets, S. Y. Tochitsky, K. V. Kozlov. *Proc. SPIE 4351, Laser Optics 2000: High-Power Gas Lasers*, 26—30 June 2000, St. Petersburg, Russia, SPIE (2001); <https://doi.org/10.1117/12.417705>
- [41] A. A. Ionin, I. O. Kinyaevskiy, Yu. M. Klimachev, A. A. Kotkov, A. Yu. Kozlov, D. V. Sinitsyn, A. M. Sagitova. *Proc. 2018 Int. Conf. Laser Optics (ICLO 2018)*, 4—8 June 2018, St. Petersburg, Russia, IEEE (2018) 100

- [42] **A. A. Ionin, I. O. Kinyaevskiy, Yu. M. Klimachev, A. A. Kotkov, A. Yu. Kozlov, A. M. Sagitova, D. V. Sinitsyn, O. A. Rulev, V. V. Badikov, D. V. Badikov.** *Opt. Express*, **27**, N 17 (2019) 24353—24361
- [43] **A. Ionin, I. Kinyaevskiy, Y. Klimachev, A. Kotkov, A. Kozlov, A. Sagitova, L. Seleznev, D. Sinitsyn.** *Proc. SPIE 11162, High Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects III*, 9—12 September 2019, Strasbourg, France, SPIE (2019) 11620D
- [44] **C. Shi, M. Ermold, G. Oulundsen, L. Newman.** *Proc. SPIE 10911, High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems VIII*, 2—7 February 2019, San Francisco, California, United States, SPIE (2019) 109110M
- [45] **A. Held.** *Laser Technik J.*, **13**, N 3 (2016) 15—17
- [46] **P. Rosenthal, D. Müller, G. Oulundsen.** CO Lasers Benefit via Drilling and Wafer Debonding, *Laser Focus World* (2019), <https://www.laserfocusworld.com/industrial-laser-solutions/article/14221544/co-lasers-benefit-via-drilling-and-wafer-debonding>
- [47] **T. Oriekhov, C. M. Harvey, K. Mühlberger, M. Fokine.** *J. Opt. Soc. Am. B*, **38**, N 12 (2021) F130—F137
- [48] **C. M. Harvey, K. Mühlberger, T. Oriekhov, P. Maniewski, M. Fokine.** *J. Opt. Soc. Am. B*, **38**, N 12 (2021) F122—F129
- [49] **Diamond Cx-10LQS Q-Switched CO₂ Lasers.** Coherent, Inc. (2021), https://www.coherent.com/content/dam/coherent/site/en/resources/datasheet/lasers/COHR_DiamondCx-10LQS_DS_0118_3.pdf
- [50] **Щелевые CO₂-лазеры (каталог).** ЗАО “РЛС” (Российские лазерные системы) (2021), http://www.slab-laser.ru/catalog/katalog_CO2-lasers.pdf
- [51] **Волноводные CO₂-лазеры. Специальные технологии** (2021), <http://www.специальные-технологии.рф/CO2-lasers.html>
- [52] **Волноводные (CO₂) лазеры.** АО “Плазма” (2021), <https://www.plasmalabs.ru/category/index/id/13>
- [53] **В. В. Бадиков.** Нелинейно-оптические и лазерные кристаллы для создания приборов квантовой электроники. Аттестаты зрелости (2012), http://55.vixpo.nsu.ru/?int=VIEW&el=560&templ=WINDOW_VIEW
- [54] **Оптические элементы из ZnGeP₂** ООО “Лаборатория оптических кристаллов” (2022), <http://loc-ltd.com/zngp2/>
- [55] **А. А. Ионин, Ю. М. Климачев, А. Ю. Козлов, А. А. Котков, О. А. Романовский, О. В. Харченко, С. В. Яковлев.** *Журн. прикл. спектр.*, **81**, № 2 (2014) 313—316 [**A. A. Ionin, Yu. M. Klimachev, A. Yu. Kozlov, A. A. Kotkov, O. A. Romanovskii, O. V. Kharchenko, S. V. Yakovlev.** *J. Appl. Spectr.*, **81**, N 2 (2014) 309—312]
- [56] **M. A. Van Zeeland, R. L. Boivin, D. L. Brower, T. N. Carlstrom, J. A. Chavez, W. X. Ding, R. Feder, D. Johnson, L. Lin, R. C. O’Neill, C. Watts.** *Rev. Sci. Instr.*, **84**, N 4 (2013) 043501