

Широкополосная лазерная система на монооксиде углерода, действующая в интервале длин волн 2.5 – 8.3 мкм

Ю.М.Андреев, А.А.Ионин, И.О.Киняевский, Ю.М.Климачев,
А.Ю.Козлов, А.А.Котков, Г.В.Ланский, А.В.Шайдуко

Продemonстрировано двухкаскадное преобразование частоты излучения СО-лазера в одном образце нелинейного кристалла $ZnGeP_2$. Для накачки кристалла использовался импульсно-периодический криогенный СО-лазер низкого давления, действующий на ~ 150 колебательно-вращательных переходах в интервале длин волн 5.0–7.5 мкм, что соответствует частотному интервалу более половины октавы. В первом каскаде преобразования путем генерации второй гармоники и суммарных частот различных пар линий излучения СО-лазера получено ~ 350 линий в интервале длин волн 2.5–3.7 мкм. Во втором каскаде путем смешения излучения, преобразованного в первом каскаде, и остаточного излучения СО-лазера получено ~ 90 линий в интервале длин волн 4.3–5.0 мкм и более 80 линий в интервале 7.5–8.3 мкм. Таким образом, на базе одного образца нелинейного кристалла $ZnGeP_2$ с накачкой излучением одного СО-лазера создан источник широкополосного (более полутора октав) лазерного излучения, действующий одновременно на ~ 670 линиях в интервале длин волн 2.5–8.3 мкм.

Ключевые слова: импульсно-периодический криогенный СО-лазер низкого давления, генерация второй гармоники, генерация суммарных и разностных частот.

1. Введение

Разработка источников лазерного излучения среднего и дальнего ИК диапазонов представляет большой интерес для спектроскопии, фотохимии, разделения изотопов и ряда других применений. Один из перспективных путей освоения новых спектральных диапазонов связан с параметрическим преобразованием частоты излучения существующих лазеров методами нелинейной оптики, в частности путем генерации суммарных и разностных частот.

Кристалл $ZnGeP_2$ (ZGP) – один из наиболее перспективных нелинейных оптических кристаллов для преобразования частоты излучения лазеров в среднем ИК диапазоне спектра. Он характеризуется высокими механическими (твердость 5.5 по шкале Мооса) и тепловыми (теплопроводность $0.36 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$) свойствами, большой лучевой стойкостью [1], а также низкими оптическими потерями (коэффициент поглощения не более 0.01 см^{-1}) в диапазоне длин волн 3–8 мкм [2]. С помощью кристалла ZGP осуществлены различные трехволновые взаимодействия. Например, в работе [3] сообщается о получении внутренней эффективности генерации второй гармоники (ГВГ) CO_2 -лазера, равной 80%, а в работе [4] – о создании генератора суммарных частот (ГСЧ) излучения CO_2 -лазеров.

Ю.М.Андреев, Г.В.Ланский, А.В.Шайдуко. Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055 Томск, Академический просп., 10/3; Сибирский физико-технический институт им. В.Д.Кузнецова Томского государственного университета, Россия, 634050 Томск, пл. Новособорная, 1
А.А.Ионин, И.О.Киняевский, Ю.М.Климачев, А.Ю.Козлов, А.А.Котков. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: aion@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 25 июля 2012 г., после доработки – 20 ноября 2012 г.

Лазер на окиси углерода может действовать в широком спектральном интервале частот примерно на 1000 колебательно-вращательных линий как в полосе основных колебательных переходов (длина волны излучения 4.7–8.2 мкм [5]), так и в полосе первого колебательного обертона (длина волны 2.5–4.2 мкм [6–8]). Однако для целого ряда применений требуется излучение, длина волны которого находится между линиями излучения СО-лазера либо выходит за пределы указанных интервалов.

Спектральный интервал 4.2–4.7 мкм, расположенный между полосами генерации излучения СО-лазера, представляет интерес с точки зрения реализации методов дистанционного зондирования, в частности из-за наличия в нем одного из основных окон прозрачности атмосферы. Для освоения этого диапазона ведутся интенсивные разработки новых лазерных источников излучения (см., напр., [9–11]). Вместе с тем задача создания источника излучения в диапазоне 4.2–4.7 мкм может быть решена путем эффективного параметрического преобразования частоты излучения СО-лазера в нелинейных кристаллах. В частности, в работе [12] в качестве варианта решения проблемы было предложено создать генератор разностной частоты (ГРЧ) линий основной и обертоновой полос излучения СО-лазера на основе кристалла ZGP. Позднее, в работе [13], было предложено заменить излучение обертоновой полосы второй гармоникой фундаментальной полосы излучения СО-лазера. Отметим, что реализация ГВГ и ГРЧ одновременно в одном образце кристалла уменьшает потери и экономит нелинейно-оптический материал. Ранее двухкаскадный механизм преобразования частоты в одном образце кристалла был реализован с использованием нелинейных кристаллов для ближнего ИК диапазона при накачке излучением лазера на неодимовом стекле [14–16]. При этом длина волны излучения, генерируемого на разностной частоте, не вышла за пределы ближнего ИК диапазона 2.5 мкм. В работе [17] нами было реализовано двухкаскадное преобразование частоты СО-

лазера в одном кристалле ZGP, при котором излучение ГРЧ перекрывало интервал длин волн 4.3–4.9 мкм.

Расчеты условий фазового синхронизма в кристалле ZGP, сделанные в настоящей работе, показали, что методом двухкаскадного преобразования частоты в одном образце нелинейного кристалла можно получить излучение и за пределами длинноволновой границы основной полосы излучения СО-лазера. Актуальность получения излучения среднего ИК диапазона с длиной волны более 8 мкм связана с наличием еще одного окна прозрачности атмосферы в интервале длин волн 8–12 мкм [18]. В настоящей работе исследуется двухкаскадное преобразование частот излучения СО-лазера в одном образце нелинейного кристалла ZGP с целью расширения спектра излучения как в коротковолновую, так и в длинноволновую часть среднего ИК диапазона.

2. Условия фазового синхронизма

Двухкаскадное преобразование частоты линий излучения СО-лазера может быть реализовано в одном и том же образце нелинейного кристалла при совпадении внутренних углов фазового синхронизма (ФС) для двух параметрических процессов преобразования частоты: ГВГ и ГСЧ, с одной стороны (первый каскад преобразования частоты), и ГРЧ этого излучения и остаточного излучения СО-лазера (второй каскад преобразования) – с другой. В настоящей работе рассматриваются условия ФС только для коллинеарного взаимодействия в обоих процессах. С учетом того, что ГВГ является вырожденным случаем ГСЧ, далее, для упрощения, оба процесса рассматриваются как процесс ГСЧ.

Для расчета углов ФС в кристалле ZGP в случае трехволновых взаимодействий $e + e \rightarrow o$, $o + e \rightarrow o$ и $e + o \rightarrow o$ при ГСЧ и $o - e \rightarrow o$, $o - o \rightarrow e$ и $o - e \rightarrow e$ при ГРЧ по формулам [1]

$$\frac{n_{F1}^{o,e}}{\lambda_{F1}^{o,e}} + \frac{n_{F2}^{o,e}}{\lambda_{F2}^{o,e}} = \frac{n_{SF}^o}{\lambda_{SF}^o}, \tag{1}$$

$$\frac{n_{SF}^o}{\lambda_{SF}^o} - \frac{n_{F1(F2)}^{o,e}}{\lambda_{F1(F2)}^{o,e}} = \frac{n_{DF}^{o,e}}{\lambda_{DF}^{o,e}} \tag{2}$$

соответственно использовались дисперсионные уравнения из работы [19]. В выражениях (1) и (2) $\lambda_{F1}^{o,e}$ и $\lambda_{F2}^{o,e}$ – длины волн двух взаимодействующих линий (F1 и F2) основной полосы излучения СО-лазера с обыкновенной (o) и необыкновенной (e) поляризациями; λ_{SF}^o и $\lambda_{DF}^{o,e}$ – длины волн излучения суммарной (СЧ) и разностной (РЧ) частот; $n_{F1,F2}^{o,e}$, n_{SF}^o и $n_{DF}^{o,e}$ – показатели преломления кристалла ZGP на соответствующих длинах волн.

На рис.1 показана дисперсионная зависимость внутреннего угла ФС θ_{SF} , рассчитанная для ГВГ излучения СО-лазера в кристалле ZGP при $e + e \rightarrow o$ взаимодействии. Вертикальными штриховыми линиями отмечены длины волн 5.0 и 6.7 мкм, которые соответствуют $\theta_{SF} = 48^\circ$. На том же рисунке приведен один из измеренных спектров излучения криогенного СО-лазера, в котором эти линии присутствуют. Поскольку спектр СО-лазера ($\lambda_F = 5.0 - 7.5$ мкм) расположен в области минимума дисперсионной зависимости угла ФС (минимум при $\lambda_F \approx 5.8$ мкм), то с учетом большой спектральной ширины ФС [20]

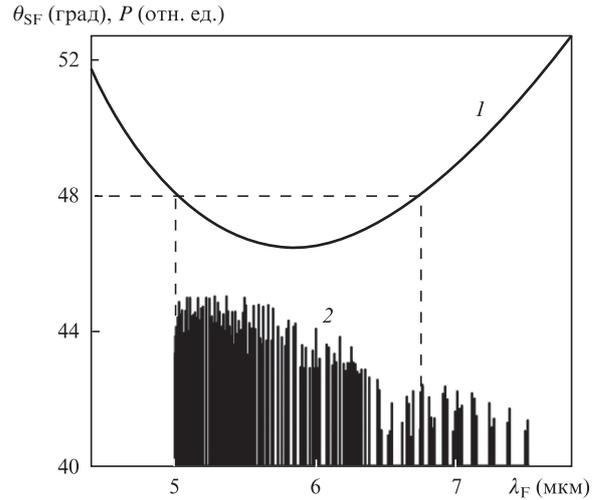


Рис.1. Внутренний угол ФС для ГВГ типа $e + e \rightarrow o$ в кристалле ZGP (1) и спектр излучения СО-лазера (2).

можно предположить, что практически весь спектр лазерного излучения может быть вовлечен в процесс ГСЧ.

На рис.2 в качестве примера представлена дисперсионная зависимость внутреннего угла ФС θ_{DF} , рассчитанная для ГРЧ излучения СЧ (o-волна) и остаточного излучения СО-лазера (e-волна) при взаимодействии типа $o - e \rightarrow e$. Три кривые ФС для ГРЧ, приведенные на рис.2, соответствуют длинам волн излучения СО-лазера $\lambda_F = 5.0, 5.6$ и 6.0 мкм. Длина волны излучения СЧ λ_{SF} возрастает вдоль кривых ФС слева направо, при этом ее увеличение от 2.5 до 3.4 мкм на каждые 0.1 мкм отмечено (для спектральной привязки) точкой на каждой кривой. Вертикальными штриховыми линиями отмечены длины волн излучения λ_{DF} , которые соответствуют тому же, что и для ГСЧ, углу $\theta_{DF} = 48^\circ$.

Из рис.1 и 2 следует, что если в спектре СО-лазера присутствует излучение с длинами волн $\lambda_F = 5.0$ и 5.6 мкм, а внутри кристалла ZGP угол между направлением распространения лазерного пучка и оптической осью составляет 48° , то будет происходить ГВГ типа $e + e \rightarrow o$ с длиной волны $\lambda_{SF} = 2.5$ мкм (рис.1). При этом взаимодействие излучения с $\lambda_{SF} = 2.5$ мкм и лазерного излучения с $\lambda_F = 5.6$

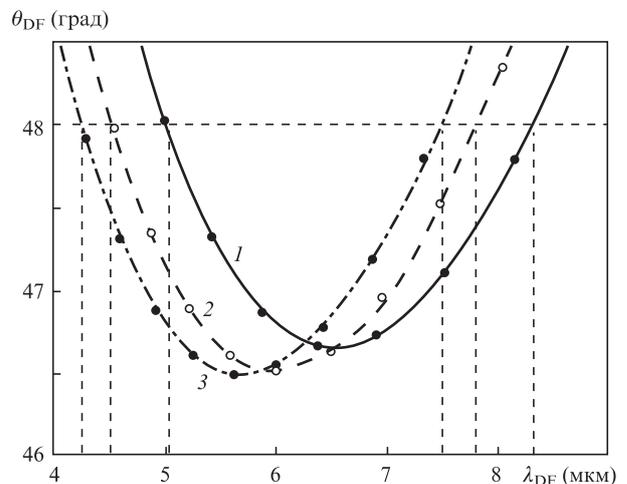


Рис.2. Внутренний угол ФС для ГРЧ типа $o - e \rightarrow e$ в кристалле ZGP, рассчитанный для длин волн излучения СО-лазера $\lambda_F = 5.0$ (1), 5.6 (2) и 6.0 мкм (3).

мкм приводит к появлению излучения РЧ с длиной волны $\lambda_{DF} = 4.5$ мкм (рис.2), в результате взаимодействия типа $o - e \rightarrow e$.

Аналогично, если в спектре СО-лазера присутствует излучение с длинами волн $\lambda_F = 6.0$ и 6.7 мкм, а внутри кристалла ZGP угол между направлением распространения лазерного пучка и оптической осью составляет 48° , то будет происходить ГВГ с длиной волны $\lambda_{SF} = 3.35$ мкм типа $e - e \rightarrow o$ (рис.1). При этом взаимодействие излучения с $\lambda_{SF} = 3.35$ мкм и лазерного излучения с $\lambda_F = 6.0$ мкм приводит к появлению излучения РЧ с длиной волны $\lambda_{DF} \approx 7.6$ мкм (рис.2) в результате взаимодействия типа $o - e \rightarrow e$. Благодаря большой ширине ФС в ZGP, преобразованием частоты излучения широкополосного СО-лазера действительно можно перекрыть широкие спектральные интервалы, в частности интервалы, обозначенные вертикальными штриховыми линиями на рис.2.

3. Экспериментальная установка

На рис.3 представлена оптическая схема эксперимента по преобразованию частоты излучения СО-лазера в кристалле ZGP. Использовался импульсно-периодический криогенный СО-лазер низкого давления 1 с накачкой разрядом постоянного тока. Импульсно-периодический режим работы лазера достигался за счет модуляции добротности резонатора. Резонатор лазера был образован глухим сферическим зеркалом 2 (радиус кривизны 9 м) и плоским выходным зеркалом 3. В данном эксперименте, в отличие от работы [17], применялось более «плотное» выходное зеркало СО-лазера с коэффициентом отражения свыше 80% в более широком интервале длин волн (4.5 – 7.5 мкм). Кроме того, в качестве рабочей смеси использовалась смесь газов, содержащая значительно больше молекул окиси углерода ($CO:N_2:He = 1:1:12$ с небольшим добавлением воздуха при общем давлении 8.2 Тор). Как показали последующие измерения, это позволило получить более широкий спектр излучения СО-лазера в интервале длин волн 5.0 – 7.5 мкм. Полученный спектр состоял из ~ 150 линий, т. е. содержал почти в два раза больше линий, чем в работе [17]. Для модуляции добротности внутри лазерного резонатора устанавливалось вращающееся зеркало 4, частота вращения которого изменялась от 30 до 130 Гц. Диафрагма 5 диаметром 8 мм обеспечивала работу лазера на основной поперечной моде. Излучение лазера представляло собой последовательность импульсов, длительность которых варьировалась от 0.3 до 1 мкс в зависимости от частоты вращения зеркала. Пиковая мощность излучения достигала 4 кВт. Лазерное излучение направлялось на непросветленный кристалл ZGP 7 длиной 17 мм. Для контроля мощности излучения накачки при-

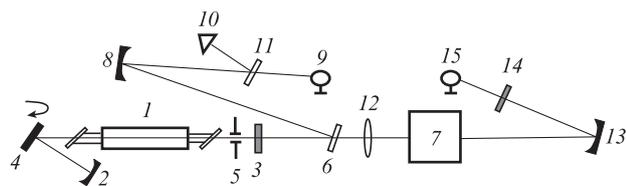


Рис.3. Оптическая блок-схема эксперимента:

1 – СО-лазер; 2 – сферическое зеркало с радиусом кривизны 9 м; 3 – частично отражающее зеркало; 4 – вращающееся зеркало; 5 – диафрагма; 6, 11 – пластины из CaF_2 ; 7 – кристалл ZGP; 8, 13 – сферические зеркала; 9, 15 – измерители мощности; 10 – фотодетектор; 12 – линза из CaF_2 ; 14 – пластина из ИК кварца.

менялась плоскопараллельная пластина 6 из CaF_2 , с помощью которой часть излучения ($\sim 5\%$), направлялась на сферическое зеркало 8 и далее в измеритель мощности 9 (Ophir 3A-SH), а также на фотодетектор 10 (PEM-L-3) для контроля временной формы импульсов, при этом использовалась еще одна плоскопараллельная пластина 11 из CaF_2 .

Лазерное излучение фокусировалось на кристалл ZGP 7 линзой 12 из CaF_2 с фокусным расстоянием 115 мм. Сферическое зеркало 13 собирало вышедшее из кристалла излучение, которое направлялось через спектральный фильтр 14 на измеритель мощности 15 (Ophir 3A-SH). Спектральный фильтр 14, изготовленный из ИК кварца, отделял преобразованное излучение (с длиной волны 2.5 – 3.7 мкм) от излучения накачки (5.0–7.5 мкм). Для измерения спектральных характеристик преобразованное излучение направлялось (без использования спектрального фильтра) в спектрометр ИКС-31 (на рис.3 не показан) со спектральным разрешением 0.4 нм.

4. Спектрально-энергетические характеристики ГСЧ и ГРЧ

Максимальная средняя мощность излучения ГСЧ наблюдалась при положении кристалла, соответствующем внутреннему углу ФС 47° . Внешний коэффициент преобразования рассчитывался путем деления средней мощности излучения СЧ на выходе из кристалла на среднюю мощность излучения накачки, падающего на кристалл. Максимальная внешняя эффективность ГСЧ-преобразования составила 3.4%, что с учетом потерь на френелевское отражение от непросветленных граней кристалла соответствует внутренней эффективности 6.5%.

Кристалл был установлен так, чтобы внутренний угол ФС составлял 48° , что соответствует углу ФС при ГВГ с длиной волны 2.5 мкм. Спектры излучения СО-лазера и преобразованного излучения представлены на рис.4. Спектр излучения накачки, который измерялся в отсутствие кристалла, находился в диапазоне длин волн 5.0–7.5 мкм и состоял примерно из 150 спектральных линий. Суммарная пиковая мощность составляла 4 кВт. Спектр излучения СЧ в кристалле ZGP лежал в интервале длин волн 2.5–3.7 мкм и состоял примерно из 350 линий излучения. Внешняя эффективность преобразования при этом составила $\sim 1\%$, а суммарная пиковая мощность достигала 40 Вт.

Спектр излучения РЧ, генерируемого в кристалле ZGP, состоял из почти 90 линий с длинами волн от 4.3 до 5.0 мкм. Мощность излучения этих линий регистрировалась тем же способом и в тех же условиях, что и мощность излучения СО-лазера накачки. Внешняя эффективность

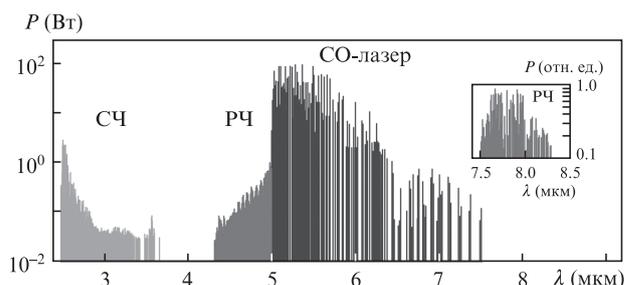


Рис.4. Измеренные спектры излучения СО-лазера накачки, суммарных и разностных частот.

генерации РЧ составила 0.23%, что соответствует внутренней эффективности 0.45%. Отсутствие излучения РЧ на длинах волн менее 4.3 мкм можно объяснить уменьшением мощности излучения на линиях с длиной волны более 6 мкм, а также поглощением излучения атмосферным углекислым газом в интервале длин волн 4.2–4.3 мкм. Полученные энергетические и спектральные характеристики ГРЧ в диапазоне 4.3–5.0 мкм близки к результатам работы [17].

В отличие от работы [17], благодаря более широкому спектру излучения СО-лазера и увеличению чувствительности измерений, но ценой уменьшения разрешающей способности спектрометра, было зарегистрировано ~80 линий в интервале длин волн 7.5–8.3 мкм (см. вставку на рис.4). Отметим, что длина волны 8.3 мкм являлась граничной длиной волны рабочего диапазона дифракционной решетки спектрометра.

5. Сравнение измеренного и рассчитанного спектров излучения

При расчете спектров излучения СЧ и РЧ использовались идентифицированные в эксперименте линии СО-лазера с измеренными мощностями (рис.4 и 5). Внутренний угол между лазерным пучком накачки (радиусом 0.5 мм) и оптической осью кристалла был принят равным 48°.

Выражение для мощности излучения СЧ можно представить в виде [21]

$$P_{SF} = \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 L^2 P_{F1} P_{F2}}{\epsilon_0 c n_{F1} n_{F2} n_{SF} \lambda_{SF}^2 A} \text{sinc}^2\left(\frac{|\Delta k| L}{2}\right), \quad (3)$$

где d_{eff} – коэффициент эффективной нелинейности (в кристалле ZGP $d_{36} = 75$ пм/В); $L = 17$ мм – длина кристалла; P_{F1} и P_{F2} – мощности излучения лазера накачки на двух линиях; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; c – скорость света в вакууме; A – площадь сечения лазерного пучка; Δk – волновая расстройка.

Результаты расчета спектра излучения СЧ представлены на рис.5. Как в рассчитанном, так и в измеренном спектре имелся локальный максимум мощности излучения СЧ на линиях вблизи длины волны 3.5 мкм, который обусловлен выполнением точного ФС для ГСЧ в этой спектральной области. Небольшое различие (~0.2 мкм) в положении этого максимума, рассчитанном и полученном в эксперименте, может быть связано с погрешностью выставления угла кристалла $\pm 0.3^\circ$. Анализ рассчитанного спектра показал, что увеличение мощности излучения

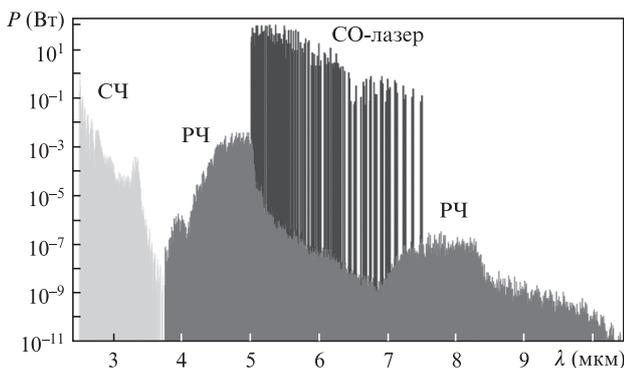


Рис.5. Рассчитанные спектры излучения суммарных и разностных частот для измеренного спектра излучения СО-лазера накачки.

накачки и чувствительности измерений приведет к увеличению количества зарегистрированных линий излучения СЧ в интервале 2.5–3.7 мкм.

Для расчета спектра излучения РЧ (рис.5) в условиях реализованного двухкаскадного преобразования излучения СО-лазера в одном образце кристалла ZGP использовался рассчитанный спектр излучения СЧ. Выражение для мощности излучения РЧ можно представить в виде [21]

$$P_{DF} = \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 L^2 P_{SF} P_F}{\epsilon_0 c n_{F1} n_{SF} n_{DF} \lambda_{DF}^2 A} \text{sinc}^2\left(\frac{|\Delta k| L}{2}\right). \quad (4)$$

Процессы ГСЧ и ГРЧ развиваются одновременно, и для них необходимо решать соответствующую систему связанных дифференциальных уравнений. Однако поскольку эффективность ГСЧ была мала и составляла ~1%, то в модельном анализе использовалось приближение заданного поля, и мощности линий излучения СЧ P_{SF} , как и волн накачки P_F , считались постоянными и равными их мощности на выходе из кристалла.

Поскольку поглощение излучения углекислым газом в расчетах не учитывалось, а общая структура рассчитанного спектра излучения РЧ в интервале длин волн 4.3–5.0 мкм повторяет структуру измеренного спектра преобразованного по частоте излучения (ср. рис.4 и 5) то, по-видимому, уменьшение мощности излучения РЧ при уменьшении его длины волны обусловлено в первую очередь уменьшением мощности излучения накачки.

Отсутствие линий излучения РЧ с длинами волн, превышающими 8.3 мкм, в измеренном спектре (рис.4) связано с рабочей границей используемой дифракционной решетки спектрометра (4.0–8.3 мкм). Расчеты же указывают на то, что на базе одного образца нелинейного кристалла ZGP с накачкой излучением одного СО-лазера можно создать источник широкополосного (более двух октав) лазерного излучения, действующий, по крайней мере, в интервале длин волн 2.5–10.3 мкм.

6. Заключение

В настоящей работе осуществлено одновременное двухкаскадное преобразование частоты излучения СО-лазера с длиной волны 5.0–7.5 мкм в одном образце нелинейного кристалла ZGP. При этом получено излучение в трех интервалах длин волн: 2.5–3.7 мкм, 4.3–5.0 мкм и 7.5–8.3 мкм. Излучение накачки содержало ~150 спектральных линий в интервале длин волн 5.0–7.5 мкм при пиковой мощности до 4 кВт. При ГВГ и ГСЧ излучения СО-лазера (первый каскад преобразования частоты) был перекрыт интервал длин волн 2.5–3.7 мкм, в котором зарегистрировано ~350 линий излучения. В том же самом образце (кристалл ZGP) при том же внутреннем угле накачки (48°) наблюдалась ГРЧ между излучением, полученным в первом каскаде, и излучением СО-лазера накачки (второй каскад преобразования частоты). При этом было зарегистрировано ~90 линий излучения в интервале длин волн 4.3–5.0 мкм и более 80 линий в интервале 7.5–8.3 мкм.

Таким образом, на базе одного образца нелинейного кристалла с накачкой излучением одного газового СО-лазера создана широкополосная (более полутора октав) лазерная система на монооксиде углерода, действующая примерно на 670 линиях в интервале длин волн 2.5–8.3 мкм.

Расчеты показали, что такой лазерный источник может работать в более широком интервале длин волн, по крайней мере в диапазоне 2.5–10.3 мкм.

Авторы благодарят студента НИЯУ «МИФИ» А.В. Солянова за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №12-02-01085-а, 12-02-31121-мол_а), Президиума СО РАН (в рамках интеграционного проекта № 46 от 2012 г. и проекта VII.63.3.1), Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (Соглашение №8883) и Учебно-научного комплекса ФИАНа.

1. Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. *Handbook of Nonlinear Optical Crystals* (Berlin: Springer, 1999, Vol. 64).
2. Schunemann P. *Laser Focus World*, №4, 85 (1999).
3. Андреев Ю.М., Гейко П.П., Баранов В.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **14** (11), 2252 (1987).
4. Андреев Ю.М., Воеводин В.Г., Грибеников А.И., Новиков В.П. *Квантовая электроника*, **14** (6), 1177 (1987).
5. Ионин А.А. В кн.: *Энциклопедия низкотемпературной плазмы Сер. Б. Том XI-4*. Под ред. С.И.Яковленко (М.: Физматлит, 2005, с.740).
6. Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **36** (12), 1153 (2006).
7. Басов Н.Г., Ионин А.А., Котков А.А. и др. *Квантовая электроника*, **30** (9), 771 (2000).
8. Ionin A.A., Kurnosov A.K., Napartovich A.P., Seleznev L.V. *Laser Phys.*, **20** (1), 144 (2010).
9. Doroshenko M.E., Jelínková H., Šulc J., et al. *Laser Phys. Lett.*, **9** (4), 301 (2012).
10. Бадиков В.В., Дон А.К., Митин К.В. и др. *Квантовая электроника*, **37** (4), 363 (2007).
11. Акимов В.А., Воронов А.А., Козловский В.И. и др. *Квантовая электроника*, **36** (4), 299 (2006).
12. Ionin A.A., Guo J., Zhang L.-M., et al. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 723 (2011).
13. Ionin A., Kinyaevskiy I., Klimachev Yu., Kotkov A., Kozlov A. *SPIE News Room* (2012); <http://spie.org/x84753.xml>.
14. Yarborough J.M., Ammann E.O. *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 145 (1971).
15. Бокуть Б.В., Казак Н.С., Лугина А.С. и др. *ЖПС*, **47**, 293 (1987).
16. Saltiel S.M., Kivshar Y.S. *Bulg. J. Phys.*, **27**, 57 (2000).
17. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Yu.M., et al. *Opt. Lett.*, **37**, (14), 2838 (2012).
18. Смеркалов В.А. В кн.: *Физическая энциклопедия*. Под ред. А.М.Прохорова (М.: Большая Российская энциклопедия, 1994, т. 4, с.135–137).
19. Бхар Г.Ч., Саманта Л.К., Гхош Д.К., Дас С. *Квантовая электроника*, **14** (7), 1361 (1987).
20. Андреев Ю.М., Бовдей С.Н., Гейко П.П. и др. *Оптика атмосферы*, **1** (4), 124 (1988).
21. Гурзядян Г.Г., Дмитриев В.Г., Никогосян Д.Н. *Нелинейно-оптические кристаллы. Свойства и применение в квантовой электронике: Справочник* (М.: Радио и связь, 1991).