

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 621.373.826

**Спектр излучения разностных частот СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров  
при перестройке угла фазового синхронизма  
в кристалле AgGaSe<sub>2</sub>**

**О.В. Будилова, А.А. Ионин, И.О. Киняевский, Ю.М. Климачев,  
А.Ю. Козлов, А.А. Котков, Л.В. Селезнев\***

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН  
119991, г. Москва, Ленинский пр., 53*

Поступила в редакцию 26.04.2016 г.

Проведено экспериментально-теоретическое исследование формирования спектра генерации разностных частот СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров в кристалле AgGaSe<sub>2</sub> по I типу фазового синхронизма, которое показывает перспективность данного кристалла для реализации селективного лазерного источника, перестраиваемого в интервале длин волн 12–16,5 мкм. Проведены измерения углов фазового синхронизма для генерации разностных частот СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров и их сравнение с рассчитанными по различным вариантам дисперсионных уравнений. Выбрана комбинация дисперсионных уравнений, наиболее корректно описывающая процесс генерации разностных частот в диапазоне длин волн 12–16,5 мкм.

*Ключевые слова:* средний ИК-диапазон, молекулярные газовые лазеры, генерация разностных частот, нелинейный кристалл; mid-IR range, molecular gas lasers, difference frequency generation, nonlinear crystal.

Лазерные лидары являются эффективным и перспективным инструментом для мониторинга атмосферы и экологического контроля [1]. В среднем ИК-диапазоне можно выделить три окна прозрачности атмосферы [2]: от 3 до 5 мкм (1-е окно); от 8 до 14 мкм (2-е окно) и от 16 до 22 мкм (3-е окно), – в которых, из-за малого поглощения, лазерное излучение может распространяться на большие расстояния. В настоящее время достигнут значительный прогресс в развитии мощных твердотельных лазеров, действующих в первом окне прозрачности атмосферы (3–5 мкм) [3], которые могут стать основными элементами новых лидарных систем. В то же время ощущается острая нехватка мощных перестраиваемых лазерных источников, действующих во втором и третьем окнах прозрачности атмосферы, где основными источниками остаются молекулярные газовые лазеры, такие как лазеры на монооксиде (СО) и диоксиде (СО<sub>2</sub>) углерода. В работе [4] теоретически было показано, что методом генерации суммарных частот (ГСЧ) и генерации разностных частот (ГРЧ) СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров в одном нелинейном кристалле Тl<sub>3</sub>AsSe<sub>3</sub>

можно получить множество спектральных линий в интервале длин волн от 2 до 17 мкм, которые попадают во все три окна прозрачности атмосферы и которые можно использовать для детектирования различных газов. Генерация суммарных и разностных частот СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров в кристаллах GaSe и AgGaSe<sub>2</sub> (AGSe) экспериментально исследовалась в нескольких работах (см., например, [2, 5–7]). В работах [2, 6] было продемонстрировано, что среди рассматриваемых кристаллов наибольшая эффективность ГРЧ СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров в области длин волн, больших 11 мкм, достигалась в кристалле AGSe.

В данной работе представлены результаты экспериментально-теоретического исследования особенностей формирования спектра ГРЧ СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров в кристалле AGSe по I типу фазового синхронизма. Для этого применялась лазерная система, состоящая из СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров низкого давления с синхронной модуляцией добротности лазерных резонаторов, подробно описанная в [2]. Излучение лазерной системы представляло собой последовательность импульсов длительностью ~1 мкс, следующих с частотой ~100 Гц, и пиковой мощностью ~2 кВт. Спектр излучения СО-лазера состоял из ~80 линий в интервале длин волн 5,0–6,4 мкм. В спектре СО<sub>2</sub>-лазера имелись две сильные линии с длинами волн 9,3 и 9,6 мкм, в которых содержались ~85% полной мощности излучения, и несколько слабых линий. Излучение лазерной системы фокусировалось в нелинейный кристалл AGSe линзой из ZnSe с фокусным расстоянием 18 см. Излучение, вышедшее

\* Оксана Витальевна Будилова (oksana\_budilova@mail.ru); Андрей Алексеевич Ионин (aion@sci.lebedev.ru); Игорь Олегович Киняевский (kigor@sci.lebedev.ru); Юрий Михайлович Климачев (lumk@sci.lebedev.ru); Андрей Юрьевич Козлов (akozlov@sci.lebedev.ru); Андрей Александрович Котков (aakche@sci.lebedev.ru); Леонид Владимирович Селезнев (seleznev@sci.lebedev.ru).

из кристалла, направлялось через систему фильтров, подавляющих излучение накачки и пропускающих излучение с длиной волны больше 11 мкм, в спектрометр ИКС-31, оснащенный высокочувствительным фотодетектором.

Измеренный спектр ГРЧ, полученный при угле фазового синхронизма (ФС)  $55,6^\circ$ , состоял из десяти линий в интервале длин волн от 12,0 до 12,6 мкм (рис. 1, а).

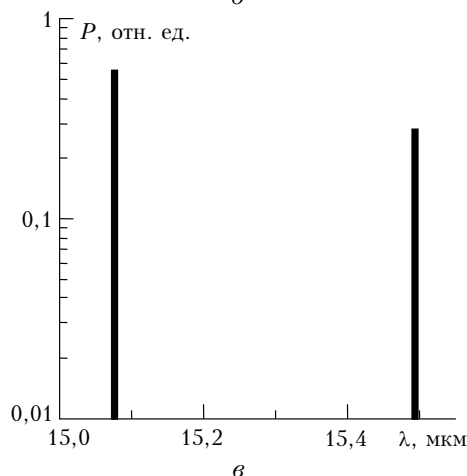
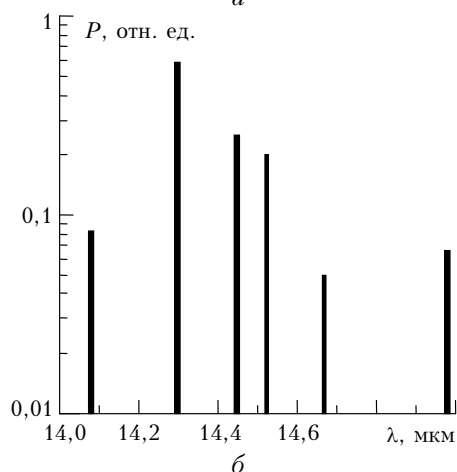
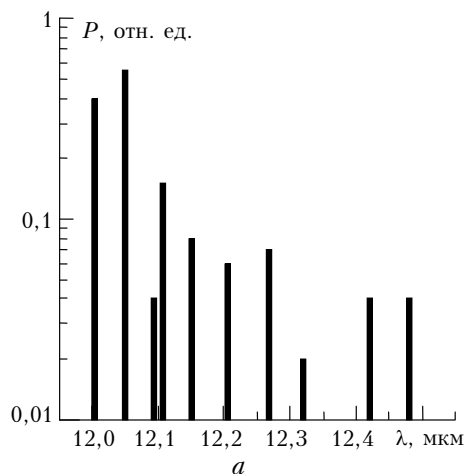


Рис. 1. Спектры излучения ГРЧ СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров, полученные в кристалле АGSe при углах фазового синхронизма  $55,6^\circ$  (а),  $67,7^\circ$  (б) и  $71,5^\circ$  (в)

Отметим, что спектр ГРЧ, полученный в кристалле GaSe в близких экспериментальных условиях, насчитывал более 20 линий в интервале длин волн 11,7–13,2 мкм [6], но при этом мощность излучения ГРЧ была в 20 раз ниже, чем в кристалле АGSe. При увеличении угла ФС кристалла АGSe спектр ГРЧ смещался в длинноволновую часть спектра, при этом число линий в нем уменьшалось (рис. 1). Одна из причин уменьшения числа спектральных линий связана с уменьшением ширины ФС при приближении к углу  $90^\circ$ . Вторая причина связана с уменьшением мощности и числа линий на высоких колебательных переходах СО-лазера, которые участвуют в формировании длинноволнового спектра ГРЧ. Например, при угле ФС  $71,5^\circ$  спектр ГРЧ насчитывал всего две линии с длинами волн 15,1 мкм и 15,5 мкм (рис. 1, в). Для увеличения мощности и числа линий в спектре ГРЧ необходимо увеличивать мощность излучения на высоких колебательно-вращательных переходах СО-лазера путем оптимизации состава лазерной смеси и возбуждения активной среды лазера.

Для численного моделирования процессов преобразования частоты необходимо точно знать параметры кристалла, в том числе значения показателей преломления. Однако в настоящее время существует несколько наборов уравнений Сельмейера для кристалла АGSe (см., например, [7–10]). В работе [7] проведены измерения углов ФС генерации второй гармоники, ГСЧ и ГРЧ СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров, на основе которых составлены уравнения Сельмейера, при этом максимальная длина волны ГРЧ не превышала 13 мкм. В работе [8] представлен другой вариант уравнений Сельмейера для кристалла АGSe, которые рекомендуются справочником [9]. В [8] показано, что представленные дисперсионные уравнения дают лучшее согласие с экспериментальными измерениями длин волн оптического параметрического генератора, перестраиваемого в спектральном интервале от 2 до 6 мкм. В работе [10] проведено измерение показателей преломления кристалла АGSe в интервале длин волн от 11 до 16 мкм и предложена новая уточненная система дисперсионных уравнений для диапазона длин волн 0,85–16 мкм. Для нахождения наиболее корректных дисперсионных уравнений в данной работе проведено измерение углов ФС при ГРЧ СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров в интервале длин волн от 12 до 16,5 мкм.

Поскольку наша лазерная система состоит из СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров, действующих в неселективном режиме генерации, то была проведена идентификация набора сильных линий ГРЧ и соответствующих им исходных длин волн СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров. Угол ФС для каждой выбранной длины волны излучения ГРЧ измерялся путем нахождения угла падения излучения на кристалл АGSe, при котором наблюдалась максимальная эффективность преобразования. Погрешность измерения угла ФС не превышала  $0,08^\circ$  и определялась, прежде всего, точностью реализации нормального падения излучения на кристалл. Измеренные значения углов ФС (показаны на рис. 2 точками) сравнивались с углами ФС,

рассчитанными по различным вариантам уравнений Сельмейера для линии CO<sub>2</sub>-лазера 9,3 мкм, при этом длина волны излучения CO-лазера бралась из интервала длин волн от 5 до 6 мкм.

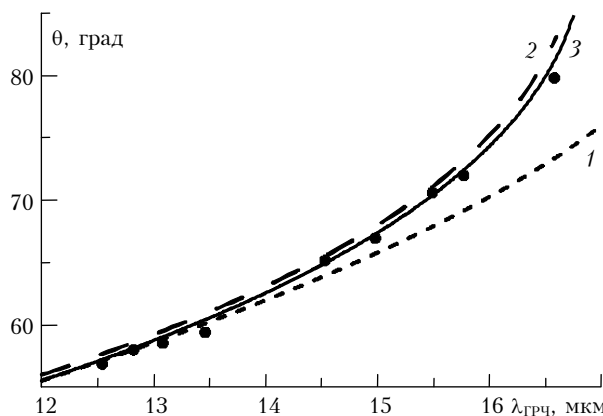


Рис. 2. Измеренные (точки) и рассчитанные (1 – по данным [8], 2 – по данным [10], 3 – комбинация уравнений из [8] и [10]) углы фазового синхронизма ГРЧ CO- и CO<sub>2</sub>-лазеров в кристалле AGSe

Рассчитанные углы ФС, полученные при использовании уравнений из работы [8] (рис. 2, кривая 1), имеют хорошее согласие с экспериментальными данными, когда длина волны ГРЧ меньше 13,5 мкм, однако при больших значениях длины волны ГРЧ кривая 1 значительно расходится с экспериментальными данными. Кривая 2 на рис. 2, соответствующая расчету углов ФС с использованием уравнений [10], хорошо согласуется с экспериментальными данными во всем рассматриваемом спектральном диапазоне, однако среднее отклонение расчета от эксперимента составляет 1,2°. Наилучшее согласие между экспериментальными данными и расчетом получено в случае, когда для расчета показателей преломления излучения накачки использовались уравнения [8], а для расчета показателей преломления излучения – ГРЧ-уравнения [10] (рис. 2, кривая 3). В этом варианте среднее отклонение расчета от эксперимента составляет 0,5°.

Таким образом, показано, что при ГРЧ излучения неселективных CO- и CO<sub>2</sub>-лазеров, спектр, полученный в кристалле AGSe, значительно уже, чем в кристалле GaSe. При перестройке в длинноволновую область спектра путем изменения угла ФС кристалла AGSe число линий в спектре ГРЧ уменьшается. Однако мощность линий ГРЧ в кристалле AGSe более чем на порядок выше, чем

в кристалле GaSe. Поэтому для реализации селективного лазерного источника, перестраиваемого во 2-м и 3-м окнах прозрачности атмосферы, кристалл AGSe является предпочтительнее, чем кристалл GaSe. Сравнение измеренных углов ФС с углами, рассчитанными по различным вариантам дисперсионных уравнений, показало, что процесс ГРЧ CO- и CO<sub>2</sub>-лазеров наиболее корректно описывается комбинацией уравнений Сельмейера: для излучения накачки – уравнения из работы [8], а для излучения ГРЧ – уравнения из работы [10].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-19-10619.

1. Васильев Б.И., Маннун У.М. ИК-лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды // Квант. электрон. 2006. Т. 36, № 9. С. 801–820.
2. Budilova O.V., Ionin A.A., Kinyevskiy I.O., Klimachev Yu.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Yu. Ultra-broadband hybrid infrared laser system // Opt. Commun. 2016. V. 363. P. 26–30
3. Rudy Ch.W. Mid-IR lasers: Power and pulse capability ramp up for mid-IR lasers // Laser Focus World. 2014. V. 50, N 5. URL: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-50/issue-05/features/mid-ir-lasers-power-and-pulse-capability-ramp-up-for-mid-ir-lasers.html>
4. Гейко П.П., Романовский О.А., Харченко О.В. Возможность преобразования частоты CO<sub>2</sub>- и CO-лазеров в монокристалле Tl3AsSe3 для целей газоанализа атмосферы // Ж. прикл. спектроскопии. 1992. Т. 56, № 5–6. С. 774–779.
5. Ионин А.А., Киняевский И.О., Климачев Ю.М., Котков А.А. Конверсия частоты излучения молекулярных газовых ИК-лазеров в нелинейных кристаллах (обзор) // Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 119, № 3. С. 27–33.
6. Budilova O.V., Ionin A.A., Kinyevskiy I.O., Klimachev Yu.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Yu. Broadband hybrid IR laser system emitting within 2.5–16.57 micron // Proc. SPIE. 2014. V. 9251. P. 92510P.
7. Kildal H., Mikkelsen J.C. The Nonlinear optical coefficient, phase-matching and optical damage in the chalcopyrite AgGaSe<sub>2</sub> // Opt. Commun. 1974. V. 9, N 3. P. 315–318.
8. Komine H., Fukumoto J.M., Long W.H., Stappaerts E.A. Noncritically phase matched mid-infrared generation in AgGaSe<sub>2</sub> // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 1995. V. 1, N 1. P. 44–49.
9. Nikogosyan D.N. Nonlinear optical crystals: A complete survey. Springer, 2005. P. 86.
10. Wang H.W., Lu M.H. The refractive index of extraordinary wave for AgGaSe<sub>2</sub> crystal in 11–16 μm range // Opt. Commun. 2001. V. 192. P. 357–363.

O.V. Budilova, A.A. Ionin, I.O. Kinyevskiy, Yu.M. Klimachev, A.Yu. Kozlov, A.A. Kotkov, L.V. Seleznev. Spectrum of difference frequency generation of CO and CO<sub>2</sub> lasers in an AgGaSe<sub>2</sub> crystal at tuning the phase matching angle.

The spectrum formation of difference frequency generation between CO<sub>2</sub> and CO lasers radiation is theoretically and experimentally studied in an AgGaSe<sub>2</sub> crystal at I type phase matching. The study shows a promise of this crystal for developing selective laser sources tunable in the wavelength range 12–16.6 microns. Phase-matching angles for difference frequency generation between CO and CO<sub>2</sub> lasers radiation were measured and compared with those calculated by various dispersion equations. The combination of dispersion equations, which describes the difference frequency generation in the wavelength range 12–16.6 μm the most correctly, was chosen.