

УДВОЕНИЕ И СМЕШЕНИЕ ЧАСТОТ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ НА МОНООКСИДЕ УГЛЕРОДА В НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛАХ ZnGeP₂ И GaSe

© 2011 г. Ю. М. Андреев*, доктор физ.-мат. наук; В. В. Зуев*, доктор физ.-мат. наук;
А. А. Ионин**, доктор физ.-мат. наук; И. О. Киняевский**;
Ю. М. Климачёв**, канд. физ.-мат. наук; А. Ю. Козлов**;
А. А. Котков**, канд. физ.-мат. наук; Г. В. Ланский*, канд. физ.-мат. наук;
А. В. Шайдуко*

* Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

** Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

E-mail: umk@sci.lebedev.ru

Экспериментально исследовано удвоение частоты излучения селективных и неселективных лазеров на монооксиде углерода в нелинейных кристаллах ZnGeP₂ и GaSe. Получена внутренняя эффективность преобразования частоты до 7% с обогащением спектра преобразованных частот за счет параллельного процесса генерации суммарных частот. Обсуждается возможность создания методами нелинейной кристаллооптики широкодиапазонного источника когерентного излучения среднего инфракрасного и терагерцового диапазонов спектра на основе лазеров на монооксиде углерода.

Ключевые слова: ZnGeP₂, GaSe, СО-лазер, генерация второй гармоники, генерация разностных частот.

Коды OCIS: 160.4330, 190.2620

Поступила в редакцию 16.09.2010

Создание широкодиапазонных перестраиваемых источников лазерного излучения представляет большой практический интерес в плане расширения возможностей существующих устройств прикладной спектроскопии. В этой связи особый интерес представляет преобразование частоты высокоэффективных хорошо отработанных в техническом плане лазеров на монооксиде углерода, излучающих в области 4,6–8,2 мкм, коэффициент полезного действия (кпд) которых до 50% [1], и 2,5–4,2 мкм (кпд до 16% [2–4]). Диапазон генерации СО-лазеров может быть значительно расширен как в ближнюю и среднюю инфракрасную (ИК), так и дальнюю ИК области спектра (терагерцовый (ТГц) диапазон) за счет удвоения или суммирования частоты линий излучения СО-лазеров, а также генерации их разностных частот (ГРЧ).

Из большого числа широко используемых в прикладной оптике нелинейных кристаллов потенциально самыми эффективными для преобразования частоты СО-лазеров в пределы среднего ИК [5–9] и ТГц [10–12] диапазонов спектра являются кристаллы ZnGeP₂ и GaSe. Слоистые

кристаллы GaSe характеризуются гораздо более широким, чем у ZnGeP₂ диапазоном прозрачности при минимальных потерях в ТГц диапазоне среди известных нелинейных кристаллов [12]. Их аномально высокое двулучепреломление ($B = 0,35$) позволяет получить все разновидности параметрических преобразователей частоты практически во всем диапазоне прозрачности, а вторая по значению (после ZnGeP₂) теплопроводность 0,162 Вт/(см К), наряду с рядом других физических свойств, добиться высоких выходных энергетических параметров [13].

В данной работе проведены исследования генерации второй гармоники (ВГ) по I типу трехвольновых взаимодействий в кристаллах ZnGeP₂ и GaSe при накачке излучением многочастотного импульсно-периодического СО-лазера низкого давления с модуляцией добротности и импульсного селективного электроионизационного (ЭИ) СО-лазера, работающего в режиме активной синхронизации мод, с использованием традиционной оптической блок-схемы.

При работе СО-лазера с модуляцией добротности и средней выходной мощностью 150 мВт

внешний коэффициент преобразования частоты излучения (отношение выходной мощности к мощности накачки) в кристалле ZnGeP₂ длиной 12 мм превысил 1% уровень. Это соответствует почти 2% внутреннему коэффициенту преобразования. При спектре излучения накачки, состоящем примерно из 80 линий излучения в диапазоне длин волн $\lambda = 4,97\text{--}6,26$ мкм, спектр преобразованного по частоте излучения содержал не менее 110 линий в диапазоне $\lambda = 2,53\text{--}2,84$ мкм. Его средняя выходная мощность достигла 0,4 мВт при максимальном значении мощности в линии излучения на длине волны 2,6 мкм. Измерение длин волн преобразованного излучения показало, что обогащение спектра произошло из-за параллельно протекающего процесса генерации суммарных частот различных пар линий излучения СО-лазера. Спектр преобразованного излучения СО-лазера расширен в сравнении с предшествующей работой [9] в коротковолновую область с 2,65 мкм до 2,53 мкм.

Впервые исследованные энергетические характеристики преобразованного излучения СО-лазеров в кристалле GaSe показали невысокую эффективность преобразования частот этого типа лазеров. Так в кристалле длиной 4 мм внешний коэффициент преобразования излучения составил около 0,15% при средней мощности не выше 0,2 мВт. Сказалось высокое двупреломление и обусловленный им эффект сноса взаимодействующих излучений. Повышение эффективности преобразования частоты этого типа СО-лазера возможно за счет использования цилиндрической линзы для увеличения размера пучка накачки в плоскости сноса излучений.

Максимальный внешний коэффициент генерации ВГ импульсного селективного ЭИ СО-лазера, работающего в режиме активной синхронизации мод (длительность пиков излучения до 10 нс [14]), в кристалле ZnGeP₂ превысил 3,5%, что соответствует внутреннему коэффициенту около 7%.

Измеренные для диапазона $\lambda=5,0\text{--}5,7$ мкм внутренние углы фазового синхронизма (ФС) для генерации ВГ в кристалле GaSe приведены на рис. 1 вместе с зависимостями, рассчитанными с использованием широко известных дисперсионных уравнений, приведенных в работах [15, 16]. Установлено, что ошибка измерений углов ФС $\pm 30'$ обусловлена в основном точностью начального позиционирования кристалла. Для сравнения с расчетными данными на рис. 1 представлены также экспериментальные значения углов внутреннего ФС, полученные авторами этой работы для генерации ВГ излучения CO₂-лазера ($\lambda = 9,3\text{--}10,8$ мкм), Er³⁺:YSGG-лазера ($\lambda = 2,79$ мкм) и фемтосекундного параметрического генератора бегущей волны “TOPAS-C”, Литва ($\lambda = 2,12\text{--}2,9$ мкм), наряду с экспериментальными данными других авторов. Из этого рисунка видно, что наблюдается хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Это подтверждает выводы работы [20] об адекватности дисперсионных уравнений [15, 16], по крайней мере, в диапазоне длин волн короче 10,8 мкм.

Возможности выполнения условий ФС для преобразования излучения СО-лазера в ТГц диапазон определены с помощью дисперсионных уравнений [15, 16] и модифицированного программного обеспечения [21]. Установлено, что путем ГРЧ различных пар линий обеих по-

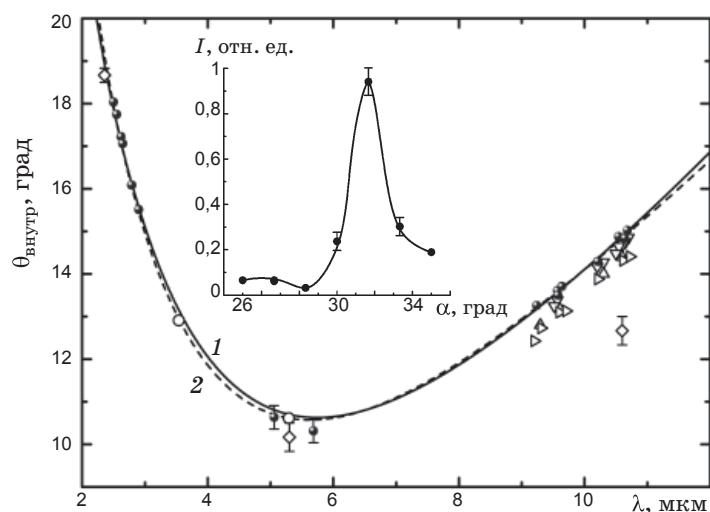


Рис. 1. Расчетные (кривые 1 [15], 2 [16]) и экспериментальные (точки: ● – данная работа, ◇ – [5], ○ – [16], △ – [17], ▽ – [18], □ – [19]) зависимости внутреннего угла ФС (θ) для генерации ВГ в кристалле GaSe. На вставке приведена зависимость выходного сигнала ВГ от внешней угловой отстройки между лучом накачки и направлением нормали к поверхности кристалла GaSe ($\lambda = 5,08$ мкм).

лос излучения СО-лазера возможно перекрытие большой части среднего ИК и ТГц диапазонов спектра (рис. 2). Кривая на рис. 2а отражает зависимость длины волны излучения при ГРЧ между двумя обертонными колебательно-вращательными переходами, один из которых соответствует длине волны 2,6993 мкм, а второй переход берется из диапазона длин волн 2,7035–2,7557 мкм. Точки отмечены конкретные переходы генерации обертонного СО-лазера из указанного диапазона, рассмотренные в качестве источника накачки. Углы ФС для ГРЧ линий излучения основной полосы и обертона в ZnGeP₂ лежат в диапазоне от 20–80°, что обеспечивает генерацию ТГц излучения на длинах волн в диапазоне 200–1200 мкм. Аналогично на рис. 2б показана возможность генерации ТГц излучения в чрезвычайно широком

диапазоне длин волн путем ГРЧ линий основной полосы излучения СО-лазера в GaSe. Следует отметить, что при соответствующем изготовлении рабочих элементов генерацию всего спектра преобразованных частот можно вызвать в одном образце кристалла ZnGeP₂ или GaSe.

Заключение

Исследована генерация второй гармоники неселективного СО-лазера с модулированной добротностью, содержащего 80 линий в основной полосе излучения, в нелинейном кристалле ZnGeP₂ и впервые в кристалле GaSe. В спектре преобразованного по частоте излучения из-за параллельно протекающего процесса генерации суммарных частот наблюдалось более 110 изолированных линий излучения в пределах 2,53–2,84 мкм. Максимальная внешняя эффективность коэффициента преобразования частоты составила 1% в кристалле ZnGeP₂ и 0,15% в кристалле GaSe. Внутренняя эффективность удвоения частоты излучения импульсного селективного ЭИ СО-лазера, работающего в режиме синхронизации мод в кристалле ZnGeP₂, достигала 7%. Для диапазона длин волн менее 10,8 мкм подтверждена адекватность дисперсионных уравнений [14, 15]. Показана возможность получения генерации ТГц излучения в широком диапазоне длин волн.

Авторы выражают благодарность за частичную финансовую поддержку ФЦП ННПИР в рамках ГК № 02.740.11.0444, НШ-4297.2010.2 и Проекта VII.63.3.1 Программы VII.63.3 СО РАН, а также Учебно-научный комплекс ФИАН.

ЛИТЕРАТУРА

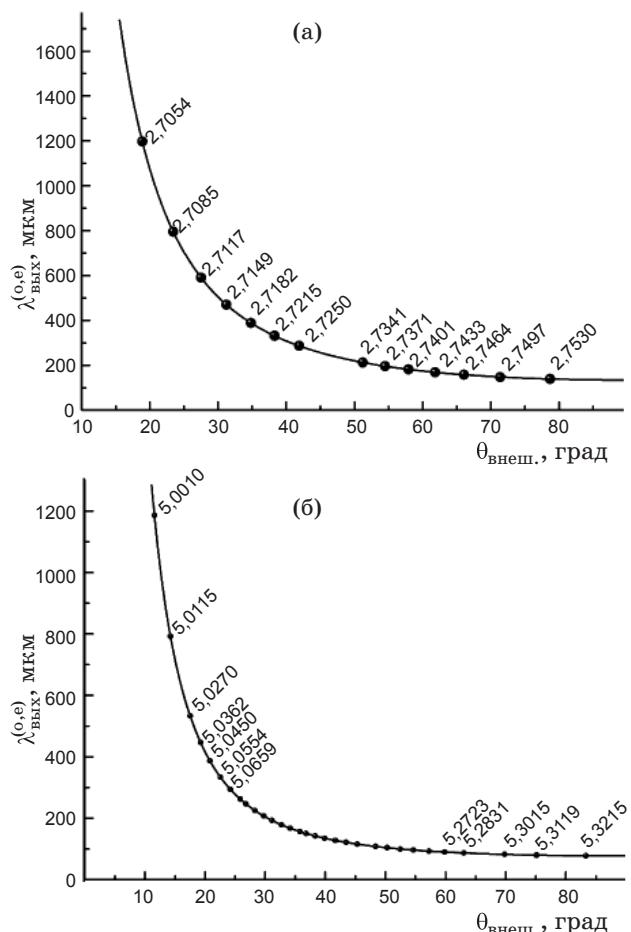


Рис. 2. Расчетные зависимости длины волны разностной частоты от угла ФС для линий обертонной полосы излучения СО-лазера в кристалле ZnGeP₂ $\lambda_{\text{вх}(1)}^{(e)} = 2,6993$ мкм, $\lambda_{\text{вх}(2)}^{(e)} \in [2,7035; 2,7557]$ – а, основной полосы в GaSe $\lambda_{\text{вх}(1)}^{(o)} = 4,9800$ мкм, $\lambda_{\text{вх}(2)}^{(o)} \in [5,0010; 5,3215]$ – б.

1. Ионин А.А. Лазеры на окиси углерода с накачкой электрическим разрядом. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. Яковленко С.И. М.: Физматлит, 2005. С. 740–752.
2. Басов Н.Г., Ионин А.А., Котков А.А., Курносов А.К., Маккорд Д.Е., Напартович А.П., Селезнев Л.В., Туркин Н.Г., Хагер Г.Д. Импульсный лазер на первом колебательном обертона молекулы CO, действующий в спектральном диапазоне 2,5–4,2 мкм. 1. Многочастотный режим генерации // Квант. электрон. 2000. Т. 30. № 9. С. 771–777.
3. Ионин А.А., Климацев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Курносов А.К., Напартович А.П., Руслев О.А., Селезнев Л.В., Синицын Д.В., Хагер Г., Шнырев С.Л. Импульсный обертонный CO лазер с КПД 16% // Квант. электрон. 2006. Т. 36. № 12. С. 1153–1154.

4. Ionin A.A., Kurnosov A.K., Napartovich A.P., Seleznev L.V. Lasers on Overtone Transitions of Carbon Monoxide Molecule // *Laser Physics*. 2010. V. 20. № 1. P. 144–186.
5. Абдуллаев Г.Б., Кулевский Л.А., Прохоров А.М., Савельев А.Д., Салаев Е.Ю., Смирнов В.В. GaSe – новый эффективный материал для нелинейной оптики // *Письма в ЖТФ*. 1972. Т. 16. № 3. С. 130–133.
6. Андреев Ю.М., Гейко П.П., Воеводин В.Г., Грибенюков А.И., Белых А.Д., Гурашвили В.А., Изюмов С.В. Удвоение частоты излучения CO лазера с эффективностью 3% // *Квант. электрон.* 1987. № 4. С. 782–783.
7. Андреев Ю.М., Ведерникова Т.В., Бетин А.А., Воеводин В.Г., Грибенюков А.И., Зырянов О.Я., Ипполитов И.И., Масычев В.И., Митропольский О.В., Новиков В.П., Новиков М.А., Соснин А.В. Преобразование излучения CO₂- и CO-лазеров на кристалле ZnGeP₂ в область спектра 2,8–3,1 мкм // *Квант. электрон.* 1985. Т. 12. № 7. С. 1535–1537.
8. Андреев Ю.М., Воеводин В.Г., Грибенюков А.И., Новиков В.П. Смешение частот CO₂- и CO-лазеров в кристаллах ZnGeP₂ // *Квант. электрон.* 1987. Т. 14. № 6. С. 1177–1178.
9. Андреев Ю.М., Бовдей С.Н., Гейко П.П., Гурашвили В.А., Зуев В.В., Изюмов С.В. Многочастотный лазерный источник диапазона 2,6–3,2 мкм // *Оптика атмосферы*. 1988. Т. 1. № 4. С. 124–127.
10. Andreev Yu.M., Apollonov V.V., Shakir Yu.A., Verzubova G.A., Griben'yukov A.I. Submillimeter-wave generation with ZnGeP₂ crystals // *J. Korean Phys. Soc.* 1998. V. 33. № 3. P. 320–325.
11. Shi W., Ding Y.J., Schunemann P.G. Coherent terahertz waves based on difference-frequency generation in an annealed zinc-germanium phosphide crystal: improvements on tuning ranges and peak powers // *Opt. Commun.* 2004. V. 233. P. 183–189.
12. Lee Yun-Shik. Principle of terahertz science and technology. N. Y.: Springer, 2008. 340 p.
13. Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. Handbook for nonlinear crystals. Berlin: Springer, 1999. V. 64. 413 p.
14. Ionin A.A., Klimachev Y.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Yu., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. Carbon monoxide laser emitting nanosecond pulses with 10 MHz repetition rate // *Opt. Commun.* 2009. V. 282. P. 294–299.
15. Vodopyanov K.L., Kulevskii L.A. New dispersion relationships for GaSe in the 0,65–18 μm spectral region // *Opt. Commun.* 1995. V. 118. P. 375–378.
16. Takaoka E., Kato K. Temperature phase-matching properties for harmonic generation in GaSe // *Jap. J. Appl. Phys.* 1999. V. 38. P. 2755–2759.
17. Абдуллаев Г.Б., Аллахвердиев К.Р., Карасев М.Е., Конов В.И., Кулевский Л.А., Мустафаев Н.Б., Пашинин П.П., Прохоров А.М., Стародумов Ю.М., Чалиев Н.И. Эффективная ГВГ CO₂-лазера в кристалле GaSe // *Квант. электрон.* 1989. Т. 16. № 4. С. 757–763.
18. Das S., Ghosh C., Voevodina O.G., Andreev Yu.M., Sarkisov S.Yu. Modified GaSe crystal as a parametric frequency converter // *Appl. Phys. B.* 2006. V. 82. P. 43–46.
19. Bhar G.C., Das S., Vodopyanov K.L. Nonlinear optical laser devices using GaSe // *Appl. Phys. B.* 1995. V. 61. P. 187–190.
20. Zhang H.-Z., Kang Z.-H., Jiang Yu., Gao J.-Yu., Wu F.-G., Feng Z.-S., Andreev Yu.M., Lanskii G.V., Morozov A.N., Sachkova E.I., Sarkisov S.Yu. SHG phase matching in GaSe and mixed GaSe_{1-x}S_x, x ≤ 0,412, crystals at room temperature // *Opt. Exp.* 2008. V. 16. № 13. P. 9951–9957.
21. Ланский Г.В., Шайдуко А.В. NLO – Second Harmonic Generation. V. 1 // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009611200. 2009.