

## УДВОЕНИЕ И СМЕШЕНИЕ ЧАСТОТ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ НА МОНООКСИДЕ УГЛЕРОДА В НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛАХ $ZnGeP_2$ 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. Климачѐв\*\*, 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  $ZnGeP_2$  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:**  $ZnGeP_2$ ,  $GaSe$ , 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  $ZnGeP_2$  и  $GaSe$ . Слоистые

кристаллы  $GaSe$  характеризуются гораздо более широким, чем у  $ZnGeP_2$  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  $ZnGeP_2$ ) 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 трехволновых взаимодействий в кристаллах  $ZnGeP_2$  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  $ZnGeP_2$  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  $\lambda = 4,97-6,26$  мкм, спектр преобразованного по частоте излучения содержал не менее 110 линий в диапазоне  $\lambda = 2,53-2,84$  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 двулучепреломление 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  $ZnGeP_2$  превысил 3,5%, что соответствует внутреннему коэффициенту около 7%.

Измеренные для диапазона  $\lambda=5,0-5,7$  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  $\Phi C \pm 30'$  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 СО<sub>2</sub>-лазера ( $\lambda = 9,3-10,8$  мкм), Er<sup>3+</sup>:YSGG-лазера ( $\lambda = 2,79$  мкм) и фемтосекундного параметрического генератора бегущей волны "TOPAS-C", Литва ( $\lambda = 2,12-2,9$  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-

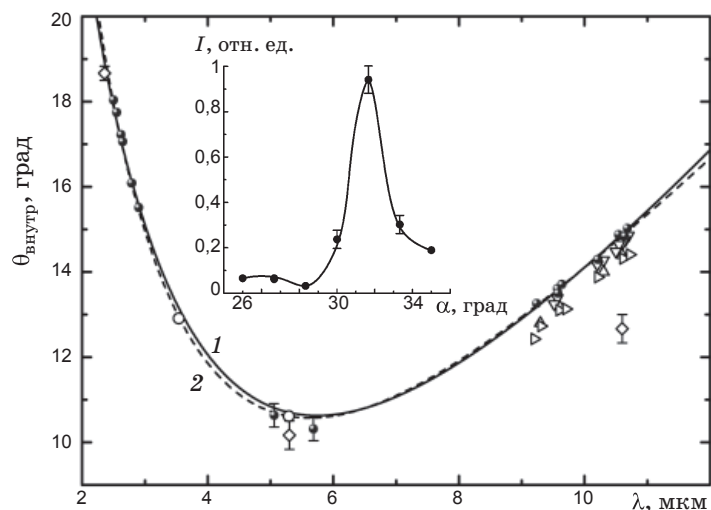


Рис. 1. Расчетные (кривые 1 [15], 2 [16]) и экспериментальные (точки: ● – данная работа, ◇ – [5], ○ – [16], △ – [17], ▽ – [18], ▷ – [19]) зависимости внутреннего угла ФС ( $\theta$ ) для генерации ВГ в кристалле GaSe. На вставке приведена зависимость выходного сигнала ВГ от внешней угловой отстройки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

лос излучения СО-лазера возможно перекрытие большей части среднего ИК и ТГц диапазонов спектра (рис. 2). Кривая на рис. 2а отражает зависимость длины волны излучения при ГРЧ между двумя обертонами 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. Точками отмечены конкретные переходы генерации обертонового СО-лазера из указанного диапазона, рассмотренные в качестве источника накачки. Углы ФС для ГРЧ линий излучения основной полосы и обертона в  $\text{ZnGeP}_2$  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  $\text{ZnGeP}_2$  или GaSe.

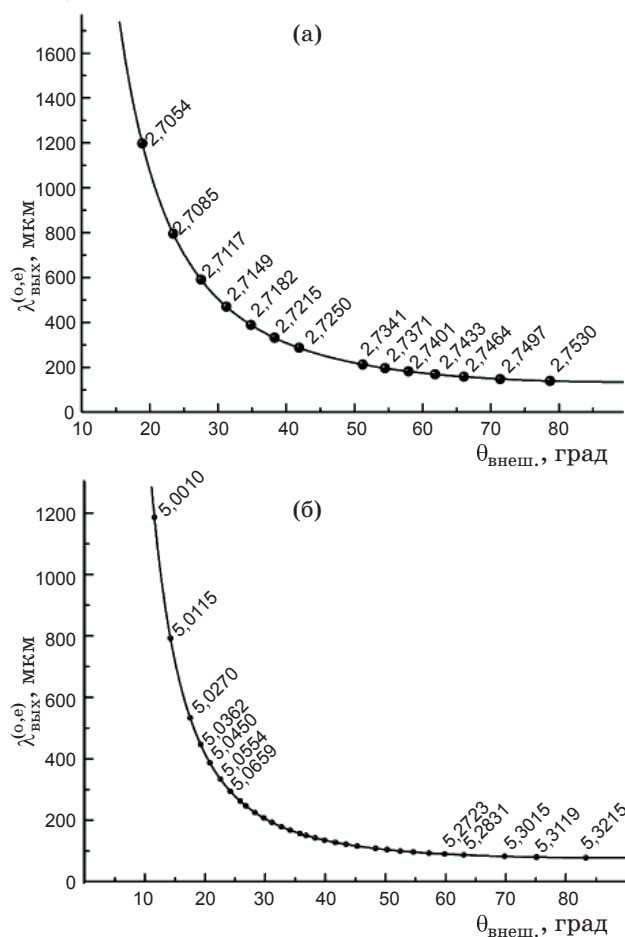
## Заключение

Исследована генерация второй гармоники неселективного СО-лазера с модулированной добротностью, содержащего 80 линий в основной полосе излучения, в нелинейном кристалле  $\text{ZnGeP}_2$  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  $\text{ZnGeP}_2$  и 0,15% в кристалле GaSe. Внутренняя эффективность удвоения частоты излучения импульсного селективного ЭИ СО-лазера, работающего в режиме синхронизации мод в кристалле  $\text{ZnGeP}_2$ , 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

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., Курносков А.К., Маккорд Д.Е., Напартович А.П., Селезнев Л.В., Туркин Н.Г., Хагер Г.Д. Импульсный лазер на первом колебательном обертоме молекулы СО, 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., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Курносков А.К., Напартович А.П., Рулев О.А., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Хагер Г., Шнырев С.Л. Импульсный обертоновый СО лазер с КПД 16% // Квант. электрон. 2006. Т. 36. № 12. С. 1153–1154.



**Рис. 2.** Расчетные зависимости длины волны разностной частоты от угла ФС для линий обертоновой полосы излучения СО-лазера в кристалле  $\text{ZnGeP}_2$   $\lambda_{\text{вх}(1)}^{(e)} = 2,6993$  мкм,  $\lambda_{\text{вх}(2)}^{(o)} \in [2,7035; 2,7557]$  мкм] – а, основной полосы в GaSe  $\lambda_{\text{вх}(1)}^{(o)} = 4,9800$  мкм,  $\lambda_{\text{вх}(2)}^{(e)} \in [5,0010; 5,3215]$  мкм] – б.

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 СО 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 СО<sub>2</sub>- и СО-лазеров на кристалле ZnGeP<sub>2</sub> в область спектра 2,3–3,1 мкм // *Квант. электрон.* 1985. Т. 12. № 7. С. 1535–1537.
8. *Андреев Ю.М., Воеводин В.Г., Грибенюков А.И., Новиков В.П.* Смещение частот СО<sub>2</sub>- и СО-лазеров в кристаллах ZnGeP<sub>2</sub> // *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., Verozubova G.A., Gribenyukov A.I.* Submillimeter-wave generation with ZnGeP<sub>2</sub> 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., Чаплив Н.И.* Эффективная ГВГ СО<sub>2</sub>-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., Lanski G.V., Morozov A.N., Sachkova E.I., Sarkisov S.Yu.* SHG phase matching in GaSe and mixed GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>,  $x \leq 0,412$ , crystals at room temperature // *Opt. Exp.* 2008. V. 16. № 13. P. 9951–9957.
21. *Ланский Г.В., Шайдук А.В.* NLO – Second Harmonic Generation. V. 1 // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009611200. 2009.