

Т.-Дж. Ванг¹, Ж.-Х. Кан¹, Дж.-Ю. Гао¹, Ю.М. Андреев²,
Г.В. Ланский², А.В. Шайдуко²

Наносекундный источник когерентного излучения диапазона 2,65–5,29 мкм для лидарных систем

¹Ведущая лаборатория когерентного излучения и молекулярной спектроскопии
Министерства образования и физической колледж, Жилинский университет, г. Чангчунь, КНР
² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 12.02.2007 г.

Проведен анализ известных и полученных данных по условиям фазосогласования в кристалле AgGaS_2 . Представлены результаты модельных и экспериментальных исследований ПГС и генераторов бегущей волны I типа, работающих в области основного окна прозрачности атмосферы 3–5 мкм. Спектром излучения наносекундного ПГС перекрыт диапазон 2,65–5,29 мкм при долговременной стабильности в работе и отсутствии эффекта насыщения. Из числа известных определены наиболее корректные уравнения Сельмейера для AgGaS_2 .

Введение

В составе лидарных систем широко используются преобразователи частоты видимого – ближнего ИК и ближнего – среднего ИК-диапазонов на основе большого количества различных нелинейных кристаллов. В настоящее время возрос интерес к высокоэффективным преобразователям частоты излучения хорошо отработанных в техническом плане лазеров ближнего ИК-диапазона в области основных окон прозрачности атмосферы 3–5 и 7,5–9 мкм, перспективных, в частности, для работы лидаров-газоанализаторов. При дополнительном применении коммерческих преобразователей частоты в видимую и УФ-часть спектра на их основе возможно создание сверхширокополосного источника излучения диапазона 0,2–14 мкм, пригодного для разработки универсальных лидарных систем. К сожалению, эффективные нелинейные кристаллы среднего ИК-диапазона, в частности CdGeAs_2 , ZnGeP_2 , Ti_3AsSe_3 и AgGaS_2 , непрозрачны или имеют большие оптические потери на длинах волн лазеров ближнего ИК-диапазона [1], что ограничивает возможности создания и эффективность преобразования их частот в средний ИК-диапазон.

В отличие от этих кристаллов отрицательные кристаллы AgGaS_2 точечной группы симметрии $\bar{4}2m$ прозрачны в диапазоне 0,47–13 мкм по «0» уровню, т.е. и во всем ближнем ИК и большей части видимого диапазона спектра. Это минимизирует не только линейные, но и нелинейные двухфотонные оптические потери для лазеров с длиной волны излучения $\lambda \geq 1$ мкм. В связи с этим большое количество работ было посвящено исследованию параметрических генераторов света (ПГС) и генераторов бегущей волны (ГБВ) на основе кристаллов

AgGaS_2 с накачкой нано- и пикосекундными лазерами ближнего ИК-диапазона на красителях, различными Nd:YAG-лазерами и фемтосекундными Ti:sapphire- and Cr:forsterite- лазерами [1–11]. В частности, спектром генерации пс ГБВ I типа на основе двух последовательно расположенных кристаллов длиной 15 и 30 мм перекрыт широкий диапазон 1,2–10 мкм [4] с квантовой эффективностью до 10% и энергией в импульсе холостых волн $\leq 0,3$ мДж в диапазоне 3–5 мкм, а спектром генерации наносекундного однорезонаторного ПГС II типа с неселективным резонатором перекрыт диапазон 3,9–11,3 мкм [3]. В последнем случае предпочтение отдано II типу взаимодействий из-за большей (на 25–30%) величины эффективной нелинейной восприимчивости в сравнении с нелинейной восприимчивостью для взаимодействий первого типа в кристаллах. Спектром генерации наносекундных ПГС I типа перекрыть весь диапазон 3–5 мкм не удалось, как и не удалось превзойти по энергии выходных импульсов уровень в 0,1 мДж.

Эффективность преобразования частоты во всех случаях редко превышала десятые доли или единицы процентов [3, 5, 6] в силу двух причин. Во-первых, минимальный среди кристаллов прозрачных в среднем ИК-диапазоне коэффициент нелинейной восприимчивости второго порядка $d_{36} = 12,5$ пм/В обуславливал необходимость использования высокоинтенсивной накачки. А вторых, минимальные коэффициенты теплопроводности $\kappa = 0,0014$ и $0,0015$ Вт/(см·К) в направлении параллельно и ортогонально оптической оси обуславливали разрушение кристаллов при попытках преодолеть достигнутые рубежи по диапазону генерации и энергетическим параметрам выходных импульсов [5].

Отметим также, что известны и используются для расчетов условий фазового синхронизма, по крайней мере, шесть полных систем дисперсионных уравнений [1–11], а выбор системы для достоверных расчетов остается открытым.

Появление в последнее время коммерческих образцов кристаллов AgGaS_2 высокого оптического качества (общий коэффициент оптических потерь $\alpha \leq 0,001 \text{ см}^{-1}$ на $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ [2]) и технологии изготовления высококачественных просветляющих покрытий позволило нам детально проанализировать условия фазового синхронизма и оценить новые возможности создания ПГС/ГБВ, работающих в диапазоне 3–5 мкм на их основе.

1. Анализ условий синхронизма

Имеются данные о следующих уравнениях Сельмейера для кристаллов AgGaS_2 :

$$\begin{aligned} n_o^2 &= 5,728 + \frac{0,2410}{\lambda^2 - 0,0870} - 0,00210\lambda^2, \\ n_e^2 &= 5,497 + \frac{0,2026}{\lambda^2 - 0,1307} - 0,00233\lambda^2, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\lambda = 0,5\text{--}13 \text{ мкм} [10],$$

$$\begin{aligned} n_o^2 &= 2,6149 + \frac{3,1769\lambda^2}{\lambda^2 - 0,0739} + \frac{2,1328\lambda^2}{\lambda^2 - 950,0}, \\ n_e^2 &= 3,0398 + \frac{2,4973\lambda^2}{\lambda^2 - 0,0912} + \frac{2,1040\lambda^2}{\lambda^2 - 950,0}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\lambda = 0,5\text{--}13 \text{ мкм} [9],$$

$$n_o^2 = 3,3970 + \frac{2,3982}{1 - 0,09311/\lambda^2} + \frac{2,1640}{1 - 950,0/\lambda^2} [5],$$

$$n_e^2 = 3,5873 + \frac{1,9533}{1 - 0,11066/\lambda^2} + \frac{2,3391}{1 - 1030,7/\lambda^2},$$

$$\begin{aligned} n_o^2 &= 5,814100 + \\ &+ \frac{0,0867547}{\lambda^{3,156983} - 0,0356502} + \frac{\lambda^{2,225043} 176380,0}{\lambda^{2,225043} - 112586195,0} + \\ &+ \frac{0,0821721}{\lambda^{4,430430} + 0,315646} + \frac{0,506566}{\lambda^{6,604280} + 6,582197}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} n_e^2 &= 5,530050 + \frac{0,0510941}{\lambda^{2,359877} - 0,141109} + \\ &+ \frac{\lambda^{2,383834} 4253,78}{\lambda^{2,383834} - 4304924,0} + \frac{0,195314}{\lambda^{2,566664} + 0,0910735}, \end{aligned}$$

$$\lambda = 0,49\text{--}12 \text{ мкм}, [7],$$

$$\begin{aligned} n_o^2 &= 5,79419 + \frac{0,23114}{\lambda^2 - 0,06882} - 2,4534 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + \\ &+ 3,1814 \cdot 10^{-7} \lambda^4 - 9,7051 \cdot 10^{-9} \lambda^6, \\ n_e^2 &= 5,54120 + \frac{0,22041}{\lambda^2 - 0,09824} - 2,5240 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + \\ &+ 3,6214 \cdot 10^{-7} \lambda^4 - 8,3605 \cdot 10^{-9} \lambda^6, \end{aligned} \quad (5)$$

$$0,54 \text{ мкм} < \lambda < 12,9 \text{ мкм} [6, 8],$$

где длина волны λ дана в мкм; n_o показатель преломления для обыкновенной волны, n_e — для необыкновенной.

Расчитанные по формулам (1)–(5) дисперсии двулучепреломления приведены на рис. 1.

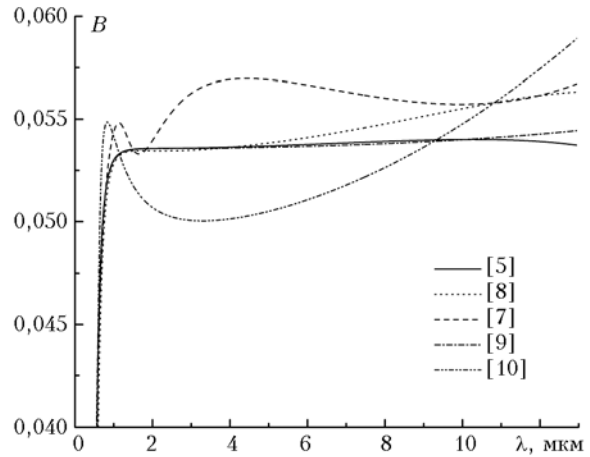


Рис. 1. Спектральная зависимость показателей двулучепреломления

Наименьшие значения двулучепреломления, оцененные в соответствии с уравнениями [10], и наибольшие значения, оцененные в соответствии с уравнениями [7], выливаются в оценочные кривые синхронизма, дающие максимальные и минимальные значения углов синхронизма для ПГС I типа практически во всем диапазоне синхронизма (рис. 2).

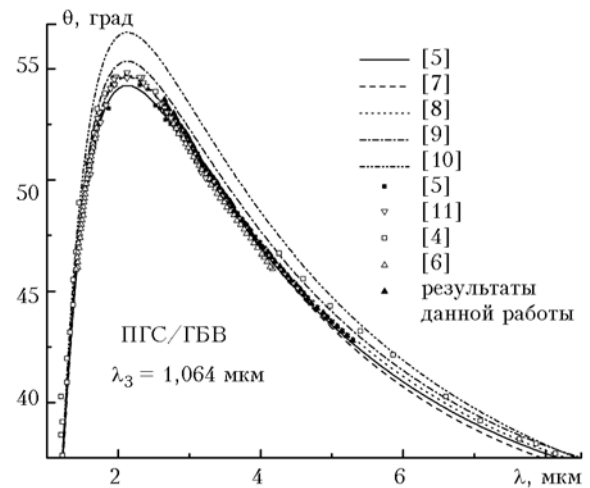


Рис. 2. Кривые синхронизма для I типа ПГС/ГБВ с накачкой Nd:YAG-лазером. Точки — экспериментальные данные

В частности, в спектральных областях, близких к точкам вырождения, углы синхронизма, рассчитанные согласно [10], на несколько градусов выше всех известных экспериментально определенных значений. Лишь результаты оценок по данным [5] незначительно превышают оценки по данным [7].

В свою очередь, данные [7, 8], заметно отличающиеся по величине двулучепреломления в боль-

шей части анализируемого диапазона, дают практически идентичные значения углов синхронизма и в точке вырождения, и в остальной части диапазона синхронизма. На основании рис. 2 можно сделать вывод, что экспериментальные данные по углам синхронизма для ПГС I типа в наибольшей степени соответствуют оценкам по дисперсионным данным [8]. Кривые синхронизма для II типа ПГС отличаются гораздо меньше до $\lambda < 10,5$ мкм, а спектральный ход экспериментальных данных полностью следует зависимостям, оцененным и по данным [7], и по данным [8]. Однако при этом во всем диапазоне измерений экспериментальные данные [8] по углам синхронизма ближе к результатам оценок не по своим данным, а по данным [7] на величину порядка 1° .

2. Эксперимент

В данной статье исследуется наносекундный ПГС I типа, собранный по обычной оптической схеме. В качестве лазера накачки использован наносекундный Nd:YAG-лазер собственного изготовления с электрооптической модуляцией добротности, имеющих следующие выходные параметры: диаметр выходного TEM₀₀ пучка излучения 1,4 мм, длительность импульсов излучения на полувысоте (FWHM) 8–10 нс, энергия импульса до 100 мДж и частота повторения импульсов до 10 Гц. Энергия импульсов накачки регулировалась с помощью четвертьволновой пластинки и призмы Глана, аттенюаторов и изменением напряжения питания. Распределение энергии в поперечном сечении пучка накачки контролировалось цифровой инфракрасной видеокамерой. Подстройка кристалла на направление синхронизма осуществлялась с точностью $4,5''$ с помощью позиционера RCA100, Zolix Instruments Co., Ltd, КНР, оснащенного шаговым двигателем и управляемого компьютером. Длина волны генерируемого излучения определялась с помощью управляемого компьютером УФ-ДИК-монокроматора SBP300, Zolix Instruments Co., Ltd, КНР, с решеткой 66 штр./мм. Импульсы излучения регистрировались с помощью охлаждаемого жидким азотом КРТ-фоторезистора с размером чувствительной площадки $0,5 \times 0,5$ мм и постоянной времени ~ 10 нс или пироэлектрическим детектором PCI-L-3, Vigo System S.A. (Польша) (область спектральной чувствительности 2–12 мкм, размер чувствительной площадкой 1×1 мм, постоянная времени < 1 нс). Временная форма зарегистрированных импульсов анализировалась с помощью цифрового двухканального осциллографа TDS3052, Tektronix Inc., с полосой пропускания 500 МГц и постоянной времени 1,3 нс. Энергия импульсов измерялась калиброванным пироэлектрическим детектором.

В данном эксперименте использован просветленный кристалл AgGaS₂ размером $10 \times 7 \times 20$ мм с ориентацией $\theta = 47^\circ$, $\phi = 45^\circ$ для I типа взаимодействий, поставленный фирмой MolTech GmbH, Germany. Как это было определено с помощью Фурье-спектрофотометра Avatar 360 FTIR, Nicolet

(USA) ($2,5\text{--}25$ мкм, спектральное разрешение 4 см^{-1}), коэффициент оптических потерь кристалла $\alpha < 0,005 \text{ см}^{-1}$ на длинах волн Nd:YAG-лазера и области максимальной прозрачности. Его рабочие поверхности просветлены и имеют высокую прозрачность (НТ) на длине волны накачки 1,06 мкм ($\text{НТ}_{1,06} > 98\%$), а также на длинах волн сигнальной ($\text{НТ}_{1,3\text{--}1,7} > 99,5\%$) и холостой ($\text{НТ}_{3\text{--}5} > 95\%$) ветви параметрической генерации. Оба диэлектрических зеркала резонатора ПГС идентичны, с $\text{НТ}_{1,06} > 98\%$, высокая отражательная способность $\text{HR}_{1,3\text{--}1,7} > 99\text{--}99,4\%$ и $\text{НТ}_{3\text{--}5} > 88\text{--}98\%$.

При накачке ПГС наносекундными импульсами получена стабильная долговременная генерация холостых длин волн в диапазоне $2,65\text{--}5,29$ мкм с энергией выходных импульсов до 0,32 мДж без признаков эффекта насыщения. Пример зависимости выходной энергии импульсов ПГС от энергии импульсов накачки представлен на рис. 3.

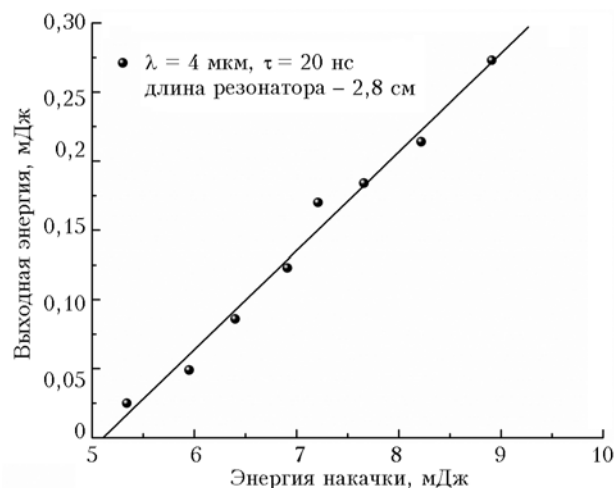


Рис. 3. Зависимость выходной энергии импульсов холостой волны ПГС от энергии импульсов накачки

Увеличение энергии накачки на величину 15–20% за счет применения оптического усилителя с коэффициентом усиления $G \geq 3$ привело к появлению признаков насыщения выходной энергии импульсов и разрушения диэлектрических зеркал после нескольких часов работы ПГС. Увеличение диаметра пучка накачки в 1,5 раза с сохранением пиковой интенсивности накачки позволило почти в два раза увеличить энергию выходных импульсов ПГС. При применении диспергирующей призмы с острым углом 30° , просветленной с тем же качеством, что и нелинейный кристалл, диапазон генерации сузился примерно в два раза. По нашим данным, спектр излучения наносекундной ПГС I типа на основе кристаллов AgGaS₂ впервые полностью перекрывает диапазон главного окна прозрачности атмосферы 3–5 мкм, а энергия наносекундных импульсов на длинах волн холостой ветви генерации – максимально высокая. Впервые запущен и ПГС с селективным резонатором.

Экспериментальные данные по углам синхронизма (см. рис. 2) хорошо соответствуют результатам

оценок по данным [8] и полностью копируют спектральный ход экспериментальных данных [6] для кристалла того же производителя. При этом абсолютное значение углов синхронизма на $20'$ превышает значения, приведенные в [6], что находится в пределах точности вырезания кристаллов. При приближении к точкам вырождения те и другие экспериментальные данные имеют тенденцию смещения к кривой синхронизма, рассчитанной по данным [9]. Вывод о такой тенденции смещения значений углов синхронизма можно сделать и для экспериментальных данных [4], и, возможно, [5, 11].

Применение Nd:YAG-лазера собственного изготовления с пассивной синхронизацией мод с помощью красителя родамин 6G с усилителем ($G > 3$), генерирующего цуг из 8–13 одиночных импульсов 100-пс длительности (FWHM), расстояние между которыми 6,2 нс, длительность огибающей (80 ± 20) нс и общая энергия цуга импульсов (2–3 мДж), не позволило зарегистрировать ГБВ из-за поверхностных разрушений кристалла и зеркал ПГС. Установлено, что лучевая стойкость кристаллов AgGaS₂ к импульсам с синхронизацией мод лишь в 5–6 раз выше, чем для гладких импульсов той же длительности.

Эффект параметрической генерации в области 3,1 мкм был зафиксирован при применении в качестве источника накачки ПГС с кольцевым резонатором Nd:YAG-лазера с пассивно-активной синхронизацией мод, генерирующего цуг из 100–120 импульсов длительностью не более 350 пс. Накачка второго непросветленного кристалла AgGaS₂ размером $5 \times 5 \times 3$ мм, поставленного ЕКСМА Со. (Литва), излучением 230-фс Ti:sapphire-лазером собственного изготовления без особых усилий позволила получить ГБВ. Эти параметрические устройства детально будут описаны в отдельной публикации.

Заклучение

По имеющимся у авторов данным впервые запущен наносекундный ПГС I типа на основе кристаллов AgGaS₂, полностью перекрывающий основное окно прозрачности атмосферы в диапазоне от 3 до 5 мкм и имеющий эксплуатационные характеристики, удовлетворяющие применениям в лидарных системах. При максимальной энергии импульсов до

0,56 мДж он перекрывает диапазон 2,65–5,29 мкм. Разработан наносекундный ПГС на AgGaS₂ с селективным резонатором. Определены наиболее корректные уравнения Сельмейера из числа известных. Показано, что они должны быть подкорректированы для лучшего соответствия результатов оценок и экспериментально определенных значений углов синхронизма для ПГС I типа в окрестности точки вырождения.

1. Gurzadyan G.G., Dmitriev V.G., Nikogosyan D.N. Handbook on Nonlinear Optical Crystals. Springer series in optical sciences. Berlin, 1999. V. 64. 413 p.
2. Douillet A., Zondy J.J., Yeliseev A., Lobanov S., Isaenko L. Stability and frequency turning of thermally loaded optical parametric oscillators // J. Opt. Soc. Amer. B. 1999. V. 16. N 9. P. 1481–1498.
3. Vodopyanov K.L., Maffettone J.P., Zwieback I., Ruderhman W. AgGaS₂ optical parametric oscillator continuously tunable from 3.9 to 11.3 μm // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. N 9. P. 1204–1206.
4. Elsaesser T., Seilmeier A., Kaiser W., Koidl P., Brandt G. Parametric generation of tunable picosecond pulses in the medium infrared using AgGaS₂ crystals // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 44. N 4. P. 383–385.
5. Fan Y.X., Eckard R.C., Byer R.L., Route R.K., Feigelson R.S. AgGaS₂ infrared parametric oscillator // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 45. N 4. P. 313–315.
6. Boon P.P., Fen W.R., Chong C.T., Xi X.B. Nanosecond AgGaS₂ optical parametric oscillator with more than 4 micron output // Jap. J. Appl. Phys. 1997. V. 36. N 12B. P. 1661–1664.
7. Roberts D.A. Dispersion equations for nonlinear optical crystals: KDP, AgGaSe₂, and AgGaS₂ // Appl. Opt. 1996. V. 35. N 24. P. 4677–4688.
8. Harasaki A., Kato K. New data on the nonlinear optical constant, phase-matching and optical damage of AgGaS₂ // Jap. J. Appl. Phys. 1997. V. 36. N 2. P. 700–703.
9. Bhar G., Smith R.C. Silver thiogallate (AgGaS₂) – Part II: Linear Optical Properties // IEEE J. Quantum. Electron. 1974. V. 10. N 7. P. 546–550.
10. Chemla D.S., Kupecek P.J., Robertson D.S., Smith R.C. Silver thiogallate, a new material with potential for infrared devices // Opt. Commun. 1971. V. 3. N 1. P. 29–31.
11. Bhar G.C., Das S., Ghosh D.K., Samanta L.K. Phase-matching of infrared nonlinear laser devices using AgGaS₂ // IEEE J. Quantum. Electron. 1988. V. 24. N 8. P. 1492–1494.

Tie-June Wang, Zhenghui Kan, Jin-Yue Gao, Y.M. Andreev, G.V. Lanskii, A.V. Shaiduko. Nanosecond source of coherent radiation of 2.65–5.29 μm spectral range for lidar systems.

Analysis of available and developed data on phase matching in AgGaS₂ crystal is carried out. Results on the model and experimental study of I type OPO and OPG are represented. Spectral range 2.65–5.29 μm is covered by emission spectrum of nanosecond OPO without saturation effect in output power and with long time operation stability. Best-fit Sellmeier equations are identified for AgGaS₂ from the number of available equations.