

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 621.373.8

## Параметрический генератор света на кристалле HGS с плавной перестройкой длины волны в диапазоне 4,75–9,07 мкм

В.С. Айрапетян, А.В. Макеев\*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий  
630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10

Поступила в редакцию 17.06.2020 г.

Разработана оптическая схема кольцевого резонатора параметрического генератора света (ПГС) на активном элементе из кристалла тиогаллата ртути с перестройкой длины волны излучения в среднем и дальнем инфракрасных диапазонах 4,75–9,07 мкм. Рассчитаны зависимости длины волны излучения ПГС от угла фазового синхронизма и распределения интенсивности выходного излучения от длины волны. Рассмотрена возможность сужения спектральной линии выходного излучения путем ввода в резонатор диспергирующего элемента (эталон Фабри–Перо).

*Ключевые слова:* параметрическая генерация света, нелинейный кристалл, тиогаллат ртути, спектральная ширина излучения лазера; optical parametric oscillator, nonlinear crystal, mercury thiogallate, spectral width of laser radiation.

### Введение

В настоящее время актуальной задачей является совершенствование лидарных систем, осуществляющих дистанционное зондирование атмосферных компонент воздуха методом дифференциального поглощения и рассеяния [1]. Среди главных требований, предъявляемых к источникам лазерного излучения, которые используются в лидарных системах, можно выделить следующие [2]:

- возможность плавной и дискретной перестройки частоты лазерного излучения;
- высокая энергия выходного излучения;
- малая расходимость выходного излучения;
- узкая спектральная ширина излучения.

Источниками накачки параметрического генератора света (ПГС) выступают преимущественно импульсные неодимсодержащие лазеры. В работах отечественных и зарубежных авторов представлены различные варианты оптических схем резонаторов для ПГС в ближнем и среднем ИК-диапазонах, их параметры приведены в табл. 1. Доминирующее положение здесь занимают линейные схемы резонаторов, которые могут обеспечивать перестройку в достаточно широком диапазоне. Однако когда значения выходной энергии удовлетворяют требованиям лазерной спектроскопии, выходное излуче-

ние ПГС быстро расходится, и расходимость увеличивается с ростом энергии лазера накачки [3–6].

Цель настоящей работы – разработка ПГС со спектральной шириной на уровне  $\leq 1 \text{ см}^{-1}$  и высокой интенсивностью выходного излучения с плавной перестройкой длины волны в 4,75–9,07 мкм.

### Экспериментальная часть

Параметрическая генерация возбуждается в активной среде, помещенной во внешний трехзеркальный резонатор, представляющий собой съемный узел лазера накачки YAG:Nd<sup>3+</sup> (рис. 1).

В наших ранних работах (например, [4, 7]) были исследованы амплитудно-временные и спектроскопические характеристики ИК ПГС на нелинейно-оптическом кристалле (НК) LiNbO<sub>3</sub> с плавной и/или дискретной перестройкой длины волны. В настоящей работе была рассчитана и разработана оптическая схема кольцевого резонатора ИК ПГС на НК HgGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> (HGS) с плавной перестройкой длины волны в диапазоне 4,75–9,07 мкм. Плавная перестройка частоты осуществляется угловым вращением НК вокруг его вертикальной оси, дискретная – воздействием внешнего постоянного электрического поля на НК. Схема ПГС на кристаллах HGS представлена на рис. 1.

Излучение YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазера с длиной волны накачки  $\lambda_n = 1,064 \text{ мкм}$  входит в резонатор ПГС через плоское зеркало M<sub>1</sub>. Активный элемент 1

\* Валерик Сергеевич Айрапетян (v.s.ayrapetyan@sngg.ru); Александр Викторович Макеев (makeeffsan@yandex.ru).

Сравнительные характеристики различных ПГС для лидарных систем

Работа	Активная среда	Тип перестройки	Диапазон перестройки, мкм	Максимальная выходная энергия в импульсе, мДж	Спектральная ширина излучения, см <sup>-1</sup>
[7]	КТР	—	$\lambda_c = 1,573$ $\lambda_x = 3,288$	70	3,5
[8]	HgGa <sub>2</sub> S <sub>4</sub>	—	$\lambda_c = 1,4-2,0$ $\lambda_x = 2,3-4,4$	0,8	—
[9]	AgGaS <sub>2</sub>	—	$\lambda_c = 3,5$	13	—
[10]	HgGa <sub>2</sub> S <sub>4</sub>	непрерывная	$\lambda_c = 3,3-3,85$ $\lambda_x = 2,4-3,1$	$67 \cdot 10^{-3}$	~5
[11]	LiNbO <sub>3</sub>	плавная	$\lambda_c = 1,5-1,85$ $\lambda_x = 2,5-3,7$	8	0,12
[12]	Cr <sup>2+</sup> :CdSe	плавная	$\lambda_c = 2,26-3,61$	—	—
[13]	ZnSe:Fe	—	$\lambda_c = 3,77-4,40$	—	—

Примечание. «—» означает отсутствие данных;  $\lambda_c$  — сигнальная волна,  $\lambda_x$  — холостая волна

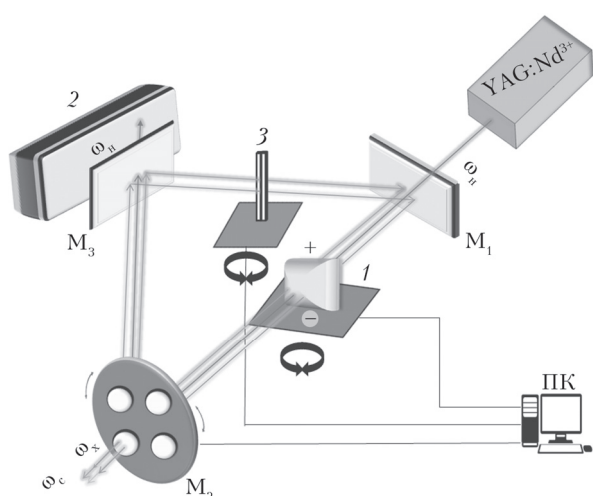


Рис. 1. Схема кольцевого резонатора ПГС: 1 — активный элемент из кристалла HGS; 2 — поглотитель; 3 — эталон Фабри-Перо;  $\omega$  — частота входного излучения

изготовлен из кристалла HGS с габаритными размерами  $10 \times 10 \times 30$  мм и ориентацией  $\theta = 47^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ .

Он установлен на юстировочном столике, который вращается вокруг вертикальной оси с точностью до  $11''$ , за счет чего происходит плавная угловая перестройка частоты излучения ПГС. В этом ПГС реализован второй тип фазового синхронизма ( $eo-e$ ) [13–15]. Зависимость длины холостой волны от угла синхронизма, рассчитанная в среде MATLAB, показана на рис. 2.

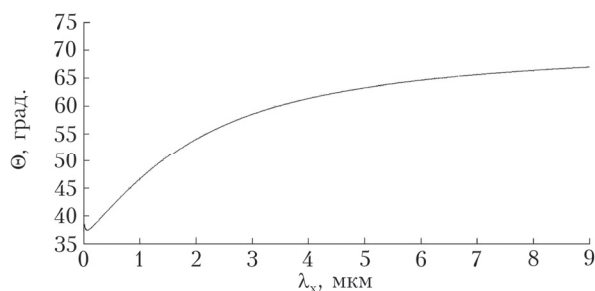


Рис. 2. Зависимость длины холостой волны от угла фазового синхронизма

Для определения значений  $\lambda_n$ , а также  $\lambda_c$  и  $\lambda_x$  применялась модель уравнения Селмейра для кристалла HGS [16, 17]. В результате вычислений получены массивы значений  $\lambda_c$  и  $\lambda_x$  и показателей преломления  $n_{он}$ ,  $n_{ен}$ ,  $n_{ох}$ ,  $n_{ех}$ ,  $n_{ос}$ ,  $n_{ес}$  (нижний индекс «о» — обыкновенная, «е» — необыкновенная поляризация) для каждого типа волны во всем диапазоне перестройки.

Для расчета зависимости  $\lambda_x$  от угла фазового синхронизма ( $\Theta$ ) использовалось выражение

$$\operatorname{tg}^2 \Theta^{eo-e} = \frac{1-X}{Y-Z}, \quad (1)$$

где

$$X = \left( \frac{\frac{n_{ох} + n_{ос}}{\lambda_x + \lambda_c}}{\frac{n_{он}}{\lambda_n}} \right)^2; \quad Y = \left( \frac{\frac{n_{ох} + n_{ос}}{\lambda_x + \lambda_c}}{\frac{n_{ен}}{\lambda_n}} \right)^2; \quad Z = \left( \frac{\frac{n_{ох} + n_{ос}}{\lambda_x + \lambda_c}}{\frac{n_{ен} + n_{ос}}{\lambda_n}} \right)^2. \quad (2)$$

Плавная перестройка длины волны в спектральном диапазоне  $4,75-9,07$  мкм выполняется поворотом кристалла на угол не менее  $7^\circ$ .

Для сужения спектральной ширины излучения ПГС в разработанной схеме в резонатор введен эталон Фабри-Перо (ЭФП) 3, установленный на управляемой вращательной платформе в третьем плече резонатора, где отсутствует мощное излучение накачки, с целью предотвращения механического разрушения его диэлектрических покрытий. Синхронным вращением активного элемента 1 и ЭФП достигается сужение спектральной ширины излучения ПГС во всем частотном диапазоне перестройки. ЭФП действует непосредственно на сигнальную волну, при этом автоматически сужая и холостую. На основе измерений, выполненных с помощью монохроматора МДР-23 [7], был произведен расчет спектральной ширины излучения; она не превышает  $0,7 \text{ см}^{-1}$ .

Для повышения выходной энергии  $\lambda_c$  и  $\lambda_x$  зеркало  $M_2$  выполнено в виде набора зеркал, установленных в револьверном механизме. Вращением механизма можно достичь оптимального значения

коэффициента отражения излучения ПГС. Зеркало  $M_3$  пропускает мощное излучение накачки, которое попадает в установленный за ним поглотитель 2.

С учетом того, что апертура нелинейного кристалла намного больше диаметра пучка лазера накачки, волновая расстройка  $\Delta = 0$ , пространственно-временная модуляция пучка лазера накачки имеет гауссовскую форму, а его амплитуда определяется выражением

$$A_3(r, 0, t) = A_{30} \exp \left[ -2 \ln 2 \left( \frac{t}{\tau_n} \right)^2 - \left( \frac{r}{\rho_0} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где

$$A_{30} = \frac{1}{\sigma} \left[ 2\delta + \frac{1}{l} \ln \frac{1}{R_1 R_2 R_3} \right] \quad (4)$$

— амплитуда излучения лазера накачки в центре луча и в максимуме импульса;  $\sigma = \frac{\omega_{c,x}, d_{эф}}{n_j c}$  — нели-

нейный коэффициент НК, где  $\omega_{c,x}$  — частота сигнальной и холостой волн,  $d_{эф}$  — эффективный нелинейный коэффициент, который определяется геометрией взаимодействия волн в кристалле,  $n_j$  — показатель преломления НК,  $c$  — скорость света в вакууме;  $l$  — длина резонатора без НК;  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  — коэффициенты отражения зеркал резонатора;  $\delta$  — коэффициент поглощения НК;  $\tau_n$  — длительность импульса накачки по уровню половины максимума интенсивности;  $\rho_0$  — радиус перетяжки пучка накачки в НК;  $r$  — радиус-вектор обхода луча в кольцевом резонаторе;  $t = \frac{nl + (L-l)}{c}$  — время об-

хода луча в кольцевом резонаторе с периметром  $L$ .

Варьируя параметры  $\tau_j$ ,  $A_{30}$ ,  $L$ ,  $\delta_j$ ,  $l$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , на основе ранее полученных экспериментальных данных [4, 7] мы рассчитали интенсивность выходного излучения ИК ПГС. Изменяя коэффициент отражения  $R_2$  зеркала  $M_2$  при неизменных значениях  $\tau_j$ ,  $A_{30}$ ,  $L$ ,  $\delta_j$ ,  $l$ ,  $R_1$  и  $R_3$ , можно добиться оптимального режима работы генератора.

Расчетное значение выходной энергии ПГС в импульсе длительностью 20 нс показано на рис. 3.

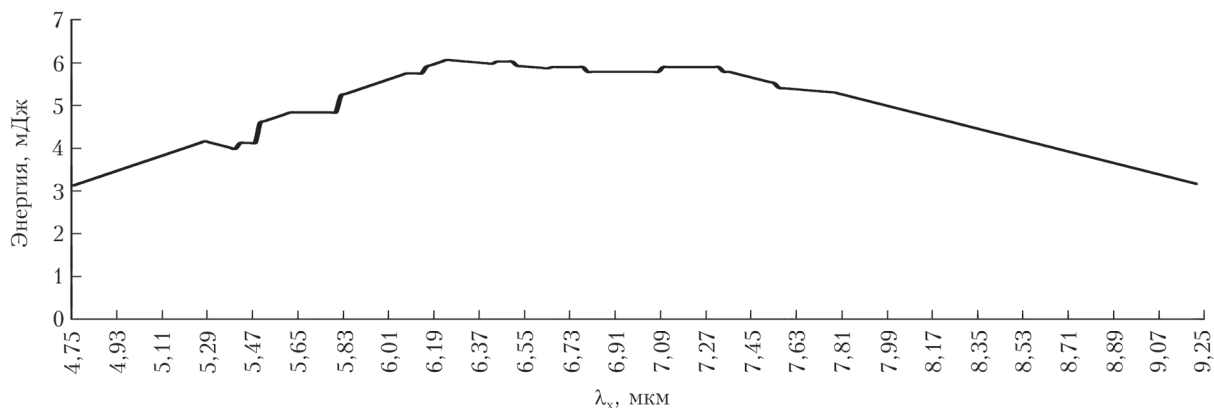


Рис. 3. Распределение энергии излучения ПГС в холостой волне

## Результаты и обсуждение

Исследование амплитудно-временных и спектральных характеристик излучения ПГС было выполнено в лабораторных условиях при частоте следования лазерных импульсов 20–30 Гц. Энергетическая нестабильность составила ~6%.

В реализованной трехзеркальной схеме суммарный коэффициент преобразования энергии лазера накачки в энергию излучения ПГС  $\mu = \frac{E_{ПГС}}{E_n}$

достигает 3,3%. Численное значение угловой расходимости пучка вычислялось, согласно [18], как отношение диаметра диафрагмы, в которую попадает 86% полной энергии импульса излучения ПГС, к фокусному расстоянию линзы  $\frac{d}{l}$ . Таким

образом было определено угловое распределение лазерного излучения в дальней зоне. Поскольку излучение ПГС представляется в виде суперпозиции сигнальной и холостой волн, измеренные параметры пучка в дальней зоне позволяют оценивать распределение энергии в отдельных волнах.

Экспериментально полученные значения расходимости  $\lambda_c$  и  $\lambda_x$  не превышали 3,5 мрад во всем диапазоне перестройки. Полученный результат совпадает с расчетом расходимости по методу  $M^2$  [19, 20].

Технические характеристики разработанного ПГС приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики ПГС на кристалле HGS

Характеристика	Значение
Тип лазера	YAG:Nd <sup>3+</sup> с ПГС
Длина волны перестройки, мкм	4,75–9,07
Суммарная энергия в импульсе, мДж	до 6 (в зависимости от длины волны излучения)
Расходимость излучения, мрад	≤ 3,5
Спектральная ширина излучения, см <sup>-1</sup>	0,5–0,7
Частота повторения импульсов, Гц	20–30
Переключение длины волны, нм	0,12–12
Длительность импульса, нс	20

## Заключение

Таким образом, по результатам исследований нелинейно-оптических свойств кристаллов HGS, а также на основе современных технологических и компьютерно-программных сред была рассчитана и разработана оптическая схема высокоэффективного резонатора ПГС с плавной перестройкой длины волны излучения в диапазоне 4,75–9,07 мкм.

Благодаря небольшой ширине спектра излучения ( $< 1 \text{ см}^{-1}$ ) такой генератор может быть использован в качестве источника излучения для лидарных систем с целью исследования и идентификации взрывчатых, наркотических и других сложных органических газовых веществ в микроокнах прозрачности атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-45-700003).

1. Wallin S., Petersson A., Ostmark H., Hobro A. Laser-based standoff detection of explosives // *Anal. Bioanal. Chem.* 2009. V. 395. P. 259–274.
2. Скворцов Л.А. Дистанционное обнаружение взрывчатых веществ с помощью методов активного формирования спектральных изображений // *Квант. электрон.* 2011. Т. 41, № 12. С. 1051–1060.
3. Weber H. Frequency tuning a mid-infrared optical parametric oscillator by the electro-optic effect // *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* 1999. V. 3826. P. 2.
4. Ayrapetian V.S., Hakobyan A.V., Apresyan G.M., Poghosyan, Sahakyan A.H., Sargsyan K.A., Sargsyan T.K. IR lidar based on OPO // *Proc. SPIE.* 2006. V. 6160. P. 708–713.
5. *Нелинейно-оптические кристаллы. Свойства и применение в квантовой электронике* / Г.Г. Гурздян, В.Г. Дмитриев, Д.Н. Никогосян (ред.). М.: Радио и связь, 1991. 160 с.
6. Wang T.J., Kang Z.H., Zhang H.Z., Feng Z.-S., Wu F.-G., Zang H.-Y., Jiang Y., Gao J.-Y. Sellmeier equations for green, yellow, and orange colored HgGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> crystals // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90, N 18. P. 181913
7. Ayrapetian V.S., Apresyan G.M., Sargsyan K.A., Sargsyan T.K. Tunable OPO for differential absorption LIDAR's // *Abstr. Conf. LAT, TQEC, LMI 72. Moscow, 22–28 June 2002.* P. 87–89.
8. Наумов В.Л., Онищенко А.М., Подставкин А.С., Шестаков А.В. Внерезонаторная параметрическая генерация света на  $\lambda = 1,5$  и 2 мкм с накачкой излучением лазеров на АИГ: Nd<sup>3+</sup> // *Квант. электрон.* 2002. Т. 32, № 3. С. 225–228.
9. Наумов В.Л., Онищенко А.М., Подставкин А.С., Шестаков А.В. Высокоэффективный параметриче-

ский преобразователь на кристаллах КТР // *Квант. электрон.* 2000. Т. 30, № 7. С. 632–634.

10. Бадиков В.В., Дон А.К., Митин К.В., Серегин А.М., Синайский В.В., Щebetова Н.И. Оптический параметрический генератор на кристалле HgGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> // *Квант. электрон.* 2003. Т. 33, № 9. С. 831–832.
11. Dukhovnikova N.Yu., Kolker D.B., Starikova M.K., Boiko A.A., Osokin A.S. Mid-IR optical source based on the optical parametric oscillator // *11th Intern. Conf. APEIE.* 2012. V. 5. P. 41–43.
12. Колкер Д.Б., Шерстов И.В., Костюкова Н.Ю., Бойко А.А., Зенов К.Г., Пустовалова Р.В. Комбинированный параметрический генератор света с непрерывной перестройкой длины волны излучения в спектральном диапазоне 2,5–10,8 мкм // *Квант. электрон.* 2017. Т. 47, № 1. С. 14–19.
13. Маркус Х., Орлов С.Н., Поливанов Ю.Н., Смирнов В.В., Фолькель Д., Хуськен Ф., Чузавков Ю.Л. Перестраиваемый в среднем ИК диапазоне узкополосный источник когерентного излучения для спектроскопических применений // *Квант. электрон.* 1998. Т. 25, № 2. С. 165–169.
14. Акимов В.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Скасьерский Я.К., Фролов М.П. Эффективный импульсный Cr<sup>2+</sup>:Cd-лазер с плавной перестройкой длины волны в спектральном диапазоне 2,26–3,61 мкм // *Квант. электрон.* 2008. Т. 38, № 3. С. 205–208.
15. Акимов В.А., Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. Эффективный ИК-лазер на кристалле ZnSe:Fe с плавной перестройкой в спектральном диапазоне 3,77–4,40 мкм // *Квант. электрон.* 2004. Т. 34, № 10. С. 912–914.
16. Kostyukova N.Y., Kolker D.B., Zenov K.G., Boyko A.A., Starikova M.K., Sherstov I.V., Karapuzikov A.A. Mercury thiogallate nano-second optical parametric oscillator continuously tunable from 4.2 to 10.8  $\mu\text{m}$  // *Laser Phys. Lett.* 2015. V. 12, N 9. P. 95401.
17. Rotermund F., Petrov V. Mercury thiogallate mid-infrared femtosecond optical parametric generator pumped at 1.25  $\mu\text{m}$  by a Cr:forsterite regenerative amplifier // *Opt. Lett.* 2000. V. 25(10). P. 746–748.
18. Бадиков В.В., Дон А.К., Митин К.В., Серегин А.М., Синайский В.В., Щebetова Н.И., Щетинкина Т.А. Оптический параметрический генератор среднего ИК-диапазона на кристалле HgGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> с накачкой импульсно-периодическим Nd:YAG-лазером // *Квант. электрон.* 2007. Т. 37, № 4. С. 363–365.
19. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.: Наука, 1990. 211 с.
20. Weber H. *Optical Resonator: Fundamentals, Advanced, Concepts and Application.* London: Springer-Verlag, 1997. 226 p.

V.S. Ayrapetian, A.V. Makeev. HGS-crystal optical parametric oscillator tunable in the wavelength range 4.75–9.07  $\mu\text{m}$ .

An optical circuit is designed for the ring cavity of an optical parametric oscillator (OPO) based on two series-mounted active elements—mercury thiogallate crystals (HgGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>) with the radiation tunable in the near and middle infrared ranges 4.75–9.07  $\mu\text{m}$ . The dependences of the radiation idle wavelength on the phase-matching angle and of the distribution of the IR OPO output radiation intensity on the idle wavelength are calculated. A possibility of narrowing the spectral width of the output radiation by introducing a dispersing element (Fabry–Perot etalon) into the cavity is considered.