

УДК 535-15

В.С. Айрапетян, А.В. МакеевСибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Российская Федерация**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА НА КРИСТАЛЛЕ AgGaS₂
В ДИАПАЗОНЕ 1,41-9,01 МКМ**

Приведены результаты расчетного и экспериментального исследований характеристик параметрического лазера с активным элементом из нелинейного кристалла AGS. Целью работы являлась разработка параметрического лазера с высокими генерационными характеристиками, такими как выходная энергия в импульсе, спектральная ширина и расходимость лазерного излучения. Разработанная оптическая схема кольцевого резонатора параметрического лазера при плавной перестройке длины волны от 1,41 до 9,01 мкм позволила получить энергию в импульсе до 11 мДж путем оптимизации отражательно-пропускательных характеристик зеркал резонатора, спектральную ширину излучения на полувысоте $4,6 \text{ см}^{-1}$, достигнутую путем ввода в резонатор эталона Фабри–Перо, и расходимость менее 1 мрад.

Ключевые слова: параметрический генератор света, кольцевой резонатор, тиогаллат серебра, эталон Фабри–Перо.

V.S. Airapetyan, A.V. MakeevSiberian State University of Geosystems and Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation**STUDY OF GENERATION CHARACTERISTICS
OF PARAMETRIC LASER ON AgGaS₂ CRYSTAL
IN THE RANGE OF 1.41-9.01 μM**

The paper presents the results of the calculated and experimental studies of the characteristics of a parametric laser with an active element made of a nonlinear AGS crystal. The developed optical scheme of the ring resonator of the parametric laser with a smooth wavelength tuning from 1.41 to 9.01 μm made it possible to obtain an energy in a pulse of up to 11 mJ, a spectral width of radiation at half-height of 4.6 cm^{-1} and a divergence of less than 1 mrad.

Keywords: parametric light generator, ring resonator, silver thiogallate, Fabry-Perot etalon.

Введение

Перестраиваемые лазеры, позволяющие осуществлять перестройку длины волны в ближнем и среднем инфракрасном (ИК) диапазонах, становятся все более актуальным инструментом для применения в различных областях науки и техники. Существует несколько способов перестройки лазерного излучения в ИК-диапазон от 1,41 до 9,01 мкм: использование многочисленных линий генерации CO₂-лазера и их гармоник [1] и параметрическое преобразование света в ИК-диапазон. Неэффективность применения CO₂-лазера в задачах спектроскопии обусловлена нерезонансным совпадением частот его дискретных линий с собственными частотами колебаний исследуемых молекул. В случае параметрических генераторов света (ПГС) на халькогенидных кристаллах можно достичь резонансного совпадения частот излучения лазера собственных колебаний исследуемой молекулы. Поэтому ПГС является наиболее эффективным инструментом для резонансного взаимодействия частоты лазерного излучения с собственной частотой молекул исследуемого вещества, однако при разработке ПГС чаще всего особое внимание уделяется достижению максимально возможного диапазона перестройки [2–12], что, несомненно, важно, однако для дистанционного зондирования атмосферы не менее важными являются максимально узкая спектральная ширина излучения ПГС и высокая выходная энергия излучения, чтобы иметь возможность эффективно работать в узких спектральных окнах прозрачности атмосферы. В данной работе представлены расчетные и экспериментальные исследования генерационных характеристик ПГС на основе вновь синтезированных нелинейных кристаллов (НК), удовлетворяющих следующим требованиям:

- 1) высокая прозрачность в области от 1,41 до 9,01 мкм;
- 2) достаточная лучевая стойкость к импульсному лазерному излучению (не менее 350 МВт/см²);
- 3) теплопроводность не ниже 2 Вт/(м·К);
- 4) величина компонент тензора квадратичной нелинейной восприимчивости на уровне 10 пм/В;
- 5) возможность получения активного элемента требуемого геометрического размера (10×10×10 мм);
- 6) стабильность свойств материала во внешней среде.

В табл. 1 приведены нелинейно-оптические характеристики НК, позволяющих осуществлять перестройку частоты излучения лазера накачки в ближнем и среднем ИК-диапазонах.

Таблица 1

Сравнительные характеристики НК среднего ИК-диапазона

Кристалл	Химическая формула	Диапазон прозрачности (мкм)	Теплопроводность максимальная (Вт/(м·К))	Оптическая нелинейность (пм/В)	Порог механических повреждений (МВт/см ²)
Тиагаллат серебра	AGS	0,5–12	1,5	12,5	350
Тиагаллат ртути	HGS	0,5–13	2,85	31,5	136
Лангасит	LGS	0,33–11,6	19	5	240
–	LIS	0,3–12	21	9,35	1000
Тиагаллат бария	BGS	0,5–9,4	16	6	286
Селеногаллат серебра	AGSE	0,73–18	1,1	33	350
–	AgGaSe _x S ₂ (1+x)	0,9–17	1,3	26	340
Селеногаллат бария	BGSe	0,5–18	0,56	14,2	225,6
Селеногаллат бария германия	BaGaGeSe ₆	0,58–12	15,7	24,3	300
Селенид кадмия	CdSe	0,71–24	6,9	18	60
Селенид галлия	GaSe	0,62–20	16,2	63	30
Арсенид галлия	GaAs	0,7–19	2,1	4,7	17
Селенид цинка	ZnSe	0,62–19	5,7	26	0,002
Селенид лития-индия	LiInSe ₂	0,43–13	19	12	500
Селенид лития-галлия	LiGaSe ₂	0,37–13,2	21,3	9,9	350
Фосфид германия цинка	ZGP	0,74–12	36	75	60
Фосфид кадмия-кремния	CdSiP ₂	0,5–9	13,6	84	120
Фосфид-галлия	GaP	1,2–18	46	60	60
Арсенид индия	InAs	0,9–18	46	28	45
Фосфид индия	InP	1,3–18	46	18	57
Антимонид индия	InSb	1,2–18	46	10	54
–	Tl ₄ HgI ₆	0,8–60	5,4	1	12

Проведенный анализ нелинейно-оптических и механических характеристик НК показывает, что наиболее эффективные выходные параметры излучения ПГС могут быть достигнуты при использовании активного элемента из кристалла AGS. Исходя из вышеизложенного, целью работы является разработка ПГС, характеристики которого (максимально узкая спектральная ширина излучения и высокий

энергосъем) позволят с высокой эффективностью использовать его в качестве источника излучения для устройств лазерной спектроскопии и мониторинга земли.

Расчет амплитудных и пространственно-временных характеристик ПГС

Оптимальные значения генерационных характеристик ПГС можно получить при решении системы уравнений [:

$$\begin{cases} \frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{v_1} \cdot \frac{\partial A_1}{\partial t} = -\delta_1 A_1 + \sigma A_2 A_3 \exp(-i\Delta Z); \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{v_2} \cdot \frac{\partial A_2}{\partial t} = -\delta_2 A_2 + \sigma A_3 A_1 \exp(-i\Delta Z); \\ \frac{\partial A_3}{\partial z} + \frac{1}{v_3} \cdot \frac{\partial A_3}{\partial t} = -\delta_3 A_3 + \sigma A_1 A_2 \exp(-i\Delta Z); \end{cases}$$

где $A_j(z, t)$ ($j=1, 2, 3$) – амплитуда сигнальной, холостой волн и волны накачки соответственно; A_j – сопряженная амплитуда сигнальной, холостой волн и волны накачки; v_j – групповые скорости волн; δ_j – коэффициент поглощения НК, который может быть определен как

$$\delta = \frac{S\omega_0^2 \Gamma}{4c(\omega_0 - \omega)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}; \Gamma = 1 \text{ см}^{-1}; l - \text{длина НК, равная 10 мм}; \sigma = \frac{W_j d_{\text{эф}}}{n_j c} -$$

нелинейный коэффициент НК; $d_{\text{эф}}$ – эффективный нелинейный коэффициент, который определяется геометрией взаимодействия волн в кристалле; n_j – показатель преломления НК; c – скорость света в вакууме; ω_j – частота сигнальной, холостой волн и волны накачки, удовлетворяющая условиям синхронизма:

$$\begin{cases} \omega_{\text{н}} = \omega_{\text{с}} + \omega_{\text{х}}, \\ k_{\text{н}} = k_{\text{с}} + k_{\text{х}} + \Delta, \end{cases}$$

где $k_{\text{н}}, k_{\text{с}}, k_{\text{х}}$ – волновые числа частоты накачки сигнальной и холостой волн и волны накачки соответственно.

Поскольку пучок имеет гауссовскую форму, его амплитуда описывается как:

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

где A_{30} – амплитуда излучения лазера накачки в центре луча и в максимуме импульса, $A_{30} = \frac{1}{\sigma} \left[2\delta + \frac{1}{l} \ln \frac{1}{R_1 R_2 R_3} \right]$; τ_H – длительность импульса накачки по уровню половины максимума интенсивности; ρ_0 – радиус перетяжки пучка накачки в НК; R_1, R_2 и R_3 – коэффициенты отражения зеркал резонатора; r – радиус-вектор обхода луча в кольцевом резонаторе; t – время обхода луча в кольцевом резонаторе с периметром L , определяется как $t = \frac{nl + (L-l)}{c}$.

Результаты экспериментальных измерений амплитудно-временных и спектральных характеристик ПГС

Теоретические [1] и экспериментальные исследования [2–3] показывают, что высокий энергосъем в сочетании с оптимальными спектральными и пространственными характеристиками излучения ПГС можно получить при внрезонаторном параметрическом преобразовании излучения импульсного YAG:Nd³⁺ лазера накачки. Оптическая схема резонатора приведена на рис. 1.

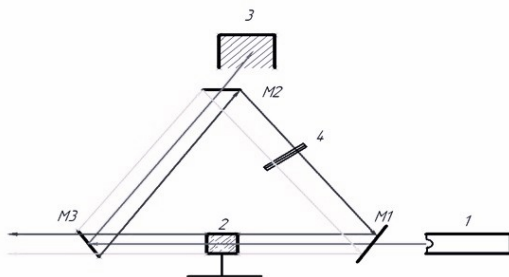


Рис. 1. Оптическая схема ПГС

Излучение лазера накачки I на кристалле YAG:Nd³⁺ с длиной волны $\lambda_p=1,064$ мкм и длительностью импульса 10 нс попадает в кольцевой резонатор через входное зеркало $M1$ и проходит через

нелинейный кристалл AGS 2, установленный для реализации угловой перестройки длины волны излучения на вращающейся платформе, приводимой в движение шаговым двигателем с точностью 11 arcsec. Ориентация кристалла $\theta=69^\circ$, $\varphi=45^\circ$. Перестроечная кривая представлена на рис. 2.

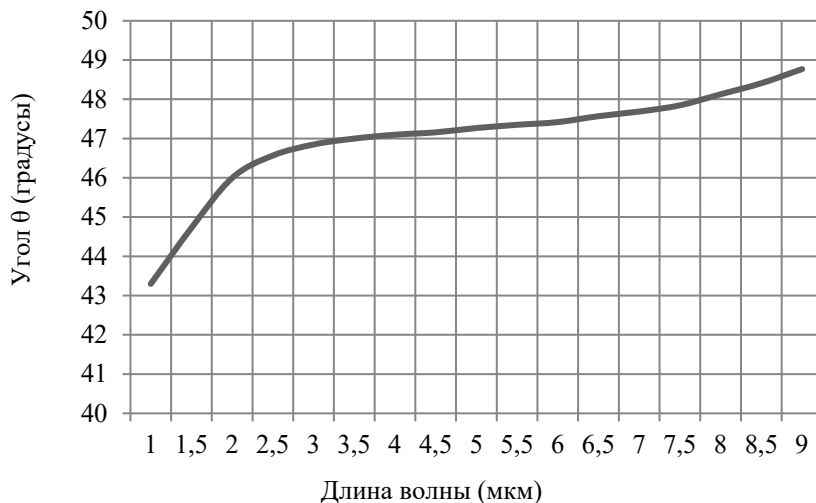


Рис. 2. Зависимость перестройки длины волны от угла поворота НК

При прохождении луча лазера накачки в нелинейном кристалле происходит переизлучение световых волн с сигнальной и холостой частотой. Далее волны отражаются от зеркала $M3$, выполненного в виде револьверного механизма, со сменным набором зеркал, для повышения выходной энергии излучения за счет оптимального пропускания на данной длине волны и попадают на зеркало $M2$, которое запирает сигнальную и холостую волну внутри резонатора и пропускает мощное излучение накачки в поглотитель 3. Такое решение вызвано необходимостью защитить диспергирующий элемент 4, выполненный в виде эталона Фабри–Перо (ЭФП), также установленного на вращающейся платформе с шаговым двигателем. Синхронным вращением ЭФП и нелинейного кристалла достигается сужение спектральной ширины выходного излучения ПГС до уровня 1 см^{-1} . Такая спектральная ширина позволяет попадать в узкие окна прозрачности атмосферы.

В целях повышения эффективности действия диспергирующего элемента была определена оптимальная толщина ЭФП.

Для случая нормального падения луча максимум пропускания ЭФП описывается как $\gamma = \frac{k}{2\pi P}$, где k – порядок интерференции, n – показатель преломления материала эталона (для германия 4), P – толщина ЭФП. Оптимальное пропускание ЭФП описано как

$$A = \frac{(1 - R^2)}{1 + R^2 + 2R \cos 2\varphi},$$

коэффициент отражения R для используемого эталона составляет 0,16, φ – фазовая толщина слоя. Коэффициент пропускания ЭФП для падающей на него плоской монохроматической волны зависит от угла падения. Оптимальный угол поворота ЭФП в зависимости от длины волны излучения определен как $\alpha = \arccos\left(\frac{\lambda \cdot \varphi}{2\pi n d}\right)$. Ширина пучка в поперечной плоскости описывается как

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2},$$

где W_0 – радиус перетяжки пучка, z_0 – релеевская

длина. Величина смещения температурных максимумов ЭФП описана как $\Delta F = -\frac{\gamma}{n} \left(\frac{\partial N}{\partial T}\right) \Delta T$, где $\frac{\partial N}{\partial T} = 3,9 \cdot 10^{-4}$, ΔT – изменение температуры ЭФП. Спектральная ширина выходного излучения оценена как $\Delta \vartheta = \frac{u}{\lambda_0^2}$, где u интервал на полувысоте пика интенсивности, λ_0 – частота, на которой наблюдается пик интенсивности излучения.

Результаты расчета оптимальной толщины ЭФП представлены в табл. 2.

На рис. 3 представлен сравнительный спектр выходного излучения ПГС без использования ЭФП и с использованием ЭФП толщиной 615 мкм.

Оптимизация параметров ПГС производилась с помощью разработанного алгоритма в среде MATLAB. Результаты расчетов во всем спектральном диапазоне представляются в виде массива данных с накоплением и последующей визуализацией. Расчетная зависимость энергии излучения ПГС от длины волны перестройки приведена на рис. 4.

Таблица 2

Зависимость спектральной ширины выходного излучения от толщины ЭФП

Толщина ЭФП (мкм)	Спектральная ширина излучения $\Delta\nu$ (см ⁻¹)
450	17,2
500	16,8
550	16,5
600	15,4
610	6,8
615	4,7
620	6,8
630	6,87
640	6,17
650	6,8

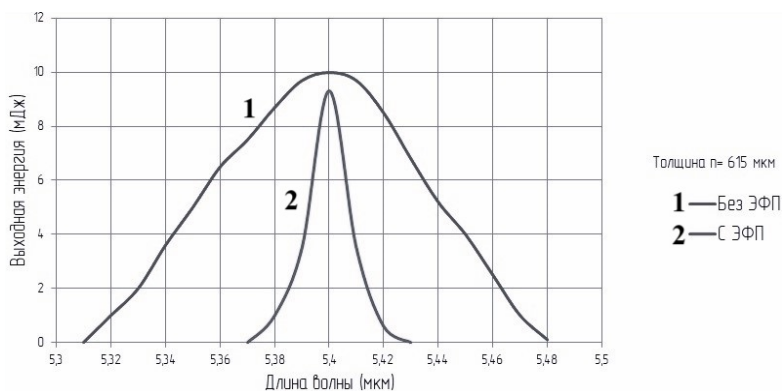


Рис. 3. Спектр выходного излучения ПГС при вводе в резонатор ЭФП

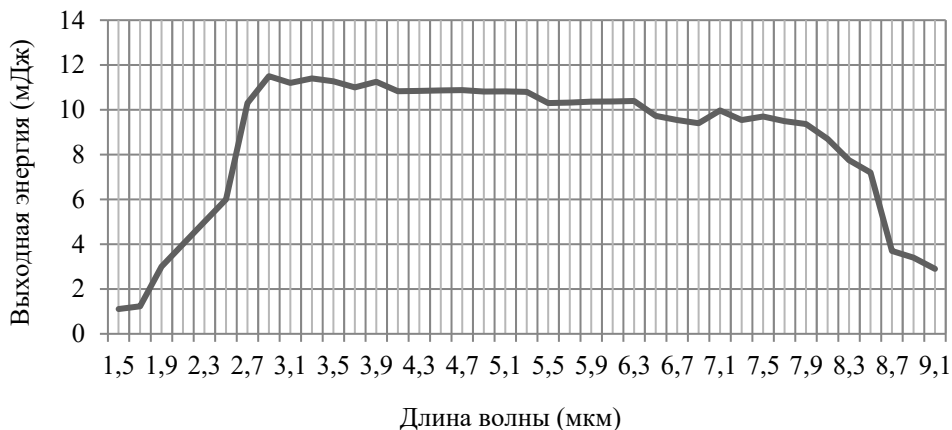


Рис. 4. Распределение выходной энергии ПГС в зависимости от длины волны

Из графика видно, что происходит спад выходной энергии ПГС, начиная со спектрального диапазона 8,5 мкм. Это обусловлено падением пропускания кристалла AGS в данной области (рис. 5), а также неоптимальностью отражательно-пропускательных коэффициентов зеркала МЗ.

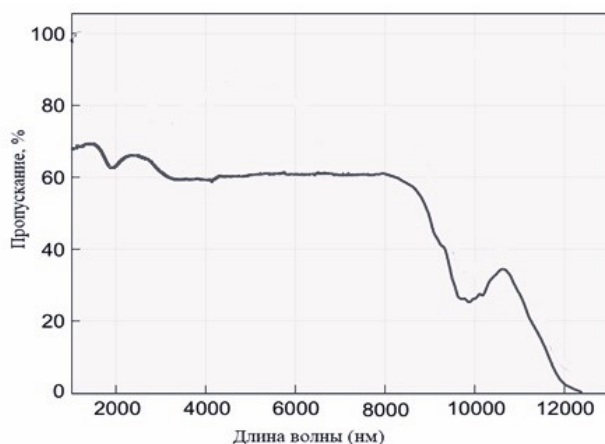


Рис. 5. Спектр пропускания кристалла AGS

Выводы

Таким образом, результаты расчетных и экспериментальных исследований позволили разработать оптическую схему кольцевого резонатора ПГС с активным элементом из кристалла AGS. Полученные энергетические (до 11 мДж в импульсе), спектральные (менее 5см^{-1} ширина излучения), пространственные (расходимость излучения менее 1 мрад) данные излучения ПГС с плавной перестройкой (шаг перестройки от импульса к импульсу менее 1 нм) в ближнем и среднем ИК-диапазонах (1,41–9,01 мкм) позволяют его применение для широкого круга задач науки и техники, таких как лидарный мониторинг, при определении амплитудно-временных, спектроскопических и физико-химических параметров сложных органических молекул.

Список литературы

1. Ананьев, Ю.А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения / Ю.А. Ананьев. – М.: Мир, 1982. – 355 с.
2. Айрапетян, В.С. ИК параметрический лазер с высокой эффективностью излучения во всем диапазоне перестройки частоты / В.С. Айрапетян, Т.А. Широкова, П.Г. Пасько // Вестник НГУ. Сер. Физика. – 2013. – Т. 10, № 4. – С. 6–10.

3. Айрапетян, В.С. Параметрический генератор света на кристалле HGS с плавной перестройкой длины волны в диапазоне 4,75–9,07 мкм / В.С. Айрапетян, А.В. Макеев // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34, № 01. – С. 57–60. DOI: 10.15372/AOO20210107

4. Optical parametric oscillator on hgs crystal with 5-9 mkm frequency reset / V. Nayrapetyan, A. Makeev [et al.] // Proc. SPIE. 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics.

5. Baumgartner, R.A. High energy near diffraction limited output from optical parametric oscillators using unstable resonators / R.A. Baumgartner, L.R. Byer // IEEE J. Quant. Electron. – 1979. – Vol. 15. – P. 432–444.

6. Дмитриев, В.Г. Прикладная нелинейная оптика: Генераторы второй гармоники и параметрические генераторы света / В.Г. Дмитриев, Л.В. Тарасов. – М.: Радио и связь, 1982.

7. Carrion, L. Development of a simple model for optical parametric generation / L. Carrion, J.-P. Girardeau-Montaut // J. Opt. Soc. Am. B. – 2000. – Vol. 17, no. 1.

8. Ахманов, С.А. Об одной возможности усиления световых волн / С.А. Ахманов, Р.В. Хохлов // ЖЭТФ. – 1962. – Т. 43, № 1. – С. 351–353.

9. Theoretical and numerical investigations of parametric transfer via difference frequency generation for indirect mid-infrared pulse shaping / J. Rawiharjo, H.S.S. Hung, D.C. Hanns, D.P. Shepherd // Journal of The Optical Society of America B-optical Physics – J OPT SOC AM B-OPT PHYSICS. – 2007. – Vol. 24, no. 4.

10. Исследование динамики внутррезонаторной параметрической генерации на длине волны 1,54 мкм / А.Г. Калинин, В.В. Назаров, Л.В. Хлопонин, В.Ю. Храмов // Оптический журнал. – 2002. – № 3, Т. 69. – С. 54–58.

11. Непрерывный иттербиевый одномодовый лазер с мощностью излучения 1500 Вт / А.А. Колегов, А.А. Абакшин, А.В. Горбачев, Д.А. Фролов // Прикладная фотоника. – 2021. – Т. 8, № 3. – С. 30–38.

12. Люминесцентные дефектные центры в кристаллах ниобата лития, легированных магнием / М.В. Смирнов, Н.В. Сидоров, М.Н. Палатников, В.Б. Пикулев // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 68–80.

References

1. Anan'ev Y.A. Opticheskie rezonatory i problema raskhodimosti lazernogo izlucheniia. Moscow: Mir, 1982, 355 p.

2. Ayrapetyan V.S., Shirokova T.A., Pasko P.G. IK parametricheskii lazer s vysokoi effektivnost'iu izlucheniia vo vsem diapazone perestroiki chastoty [The parametric IR lasers with high radiation efficiency over the entire range of frequency tuning]. Siberian Journal of Physics, 2013, vol. 10, no. 4, pp. 6-10.

3. Ayrapetyan V.S., Makeev A.V. Parametricheskii generator sveta na kristalle HGS s plavnoi perestroikoi dliny volny v diapazone 4,75–9,07 mkm [An

HGS optical parametric oscillator tunable in the 4.75-9.07 μm wavelength range]. Atmospheric and Oceanic Optics, 2021, vol. 34, no. 3, pp. 263-266.

4. Hayrapetyan V., Makeev A. et al. Optical parametric oscillator on hgs crystal with 5-9 μm frequency reset. 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Proc. SPIE, 2019, vol. 11208.

5. Baumgartner R.A., Byer L.R. High energy near diffraction limited output from optical parametric oscillators using unstable resonators. IEEE J. Quant. Electron., 1979, vol. 15, pp. 432-444.

6. Dmitriev V.G., Tarasov L.V. Prikladnaia nelineinaia optika: Generatory vtoroi garmoniki i parametri-cheskie generatory sveta. Moscow: Radio i sviaz', 1982.

7. Carrion L., Girardeau-Montaut J.-P. Development of a simple model for optical parametric generation. J. Opt. Soc. Am. B, 2000, vol. 17, no. 1.

8. Akhmanov S.A., Khokhlov R.V. Ob odnoi vozmozhnosti usileniia svetovykh voln [On one possibility of amplifying light waves]. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 1962, vol. 43, no. 1, pp. 351-353.

9. Rawiharjo J., Hung H.S.S., Hanns D.C., Shepherd D.P. Theoretical and numerical investigations of parametric transfer via difference frequency generation for indirect mid-infrared pulse shaping. Journal of The Optical Society of America B: Optical Physics, 2007, vol. 24, no. 4.

10. Kalintsev A.G., Nazarov V.V., Khloponin L.V., Khramov V.Yu. Study of the dynamics of intracavity parametric lasing at 1.54 micrometers. J. Opt. Technol., 2002, no. 3, vol. 69, p. 179.

11. Kolegov A.A., Abakshin A.A., Gorbachev A.V., Frolov D.A. Nepreryvnyi ytterbievyy odnomodovyy lazer s moshchnost'iu izlucheniia 1500 Wt [1500 W ytterbium-doped single mode CW fiber laser]. Applied Photonics, 2021, vol. 8, no. 3, pp. 30-38.

12. Smirnov M.V., Sidorov N.V., Palatnikov M.N., Pikulev V.B. Liuminestsentnye defektnye tsentry v kristallakh niobata litiia, legirovannykh magniem [Luminescent defect centers in magnesium-doped lithium niobate crystals]. Applied Photonics, 2023, vol. 10, no. 1, pp. 68-80.

Сведения об авторе

АЙРАПЕТЯН В.С.

e-mail: v.hayr10004@mail.ru

Доктор технических наук, доцент, ведущий кафедрой специальных устройств инноватики и метрологии Сибирского государственного университета геосистем и технологий, г. Новосибирск.

About the author

V.S. AIRAPETYAN

e-mail: v.hayr10004@mail.ru

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Special Devices of Innovation and Metrology, SSUGIT, Novosibirsk.

МАКЕЕВ А.В.

e-mail: *makeeffsan@yandex.ru*

A.V. MAKEEV

e-mail: *makeeffsan@yandex.ru*

Ассистент кафедры специальных устройств инноватики и метрологии Сибирского государственного университета геосистем и технологий, г. Новосибирск.

Assistant of the Department of Special Devices, Innovations and Metrology, SSUGIT, Novosibirsk.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке государственной НИР «Автоматический геодезический мониторинг природной среды и инженерных сооружений средствами малобюджетных высокоточных датчиков вертикальных перемещений в условиях Крайнего Севера» (FEFS-2023-0003).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Вклад автора 100 %.

Получена: 16.09.2024

Одобрена: 23.09.2024

Принята к публикации: 25.09.2024

Financing. The study was carried out with the support of the state budget research project “Automatic geodetic monitoring of the natural environment and engineering structures using low-budget high-precision vertical displacement sensors in the conditions of the Far North” (FEFS-2023-0003).

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

The authors' contribution is equal.

Received: 16/09/2024

Approved: 23/09/2024

Accepted for publication: 25/09/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Айрапетян, В.С. Исследование генерационных характеристик параметрического лазера на кристалле AgGaS₂ в диапазоне 1,41–9,01 мкм / В.С. Айрапетян, А.В. Макеев // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 3. – С. 50–61.

Please cite this article in English as: Airapetyan V.S., Makeev A.V. Study of generation characteristics of parametric laser on AgGaS₂ crystal in the range of 1.41-9.01 μm. *Applied photonics*, 2024, vol. 11, no. 3, pp. 50-61.