

УДК 543.421/.424
DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-6-179-185

Оптимизация спектральных и геометрических параметров параметрического генератора света среднего ИК-диапазона

В. С. Айрапетян¹, А. В. Макеев^{1}*

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: makeeffsan@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований параметров параметрического генератора света (ПГС) среднего ИК-диапазона. Одной из основных проблем ПГС ближнего и среднего ИК-диапазона (1–8 мкм) является высокая расходимость выходного излучения. Целью данного исследования является совершенствование спектральных и амплитудно-пространственных характеристик для внерезонаторной схемы кольцевого резонатора ИК-ПГС. В эксперименте *in vitro*, имитирующем излучение ИК-параметрического лазера, получены зависимости спектральной ширины и добротности излучения перестраиваемой частоты лазера от длины волны. Показано, что совершенствованные оптико-геометрические параметры внерезонаторной схемы ПГС позволили достичь высоких значений спектральной ширины излучения ($\leq 1 \text{ см}^{-1}$) и добротности ($\geq 4 \cdot 10^6$). Показано, что такая разработанная схема внерезонаторного ПГС на основе новых халькогенидных кристаллов расширит его применение в среднем и дальнем ИК-диапазонах.

Ключевые слова: нелинейный кристалл, перестраиваемый генератор света, оксидные кристаллы, халькогенидные кристаллы, селенидные кристаллы, кольцевой резонатор, спектральная ширина излучения, инфракрасное излучение

Введение

В современной лазерной технике наблюдается большой интерес к параметрическим генераторам света, излучающим в среднем и дальнем ИК-диапазонах, что обусловлено получением высокоэффективных активных элементов из кристаллов халькогенидной группы [1–7]. Область практических применений ИК-ПГС на основе халькогенидных кристаллов существенно расширяется, когда наряду с плавной перестройкой частоты достигаются высокие спектральные и амплитудно-пространственные характеристики излучения параметрического лазера.

Проблема создания таких лазеров заключается в том, что спектральные и амплитудно-

пространственные характеристики излучения ПГС для внутриврезонаторной и внерезонаторной схем резко отличаются по своим значениям [8–10].

В настоящей работе сообщается о расчетно-экспериментальном исследовании характеристик ИК-ПГС, на основе чего была разработана внерезонаторная кольцевая схема, позволяющая плавную и/или дискретную перестройку частоты излучения в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Максимальная энергия импульса лазера составляла 6 мДж на длине волны $\lambda = 2,7 \text{ мкм}$ при спектральной ширине излучения $\leq 1 \text{ см}^{-1}$. Эффективность преобразования излучения накачки в суммарную сигнальную и холостую волны – 19 %.

Расчетно-экспериментальные результаты и их обсуждение

В ранних работах [11–13] сообщалось о разработке кольцевого резонатора ПГС с активным элементом из нелинейного кристалла LiNbO_3 , позволяющего эффективную перестройку основного излучения лазера накачки ($\lambda = 1,064$ мкм) в средний ИК-диапазон ($\lambda = 1,41$ – $4,24$ мкм).

Результаты расчетно-экспериментальных исследований внрезонаторных ПГС показали, что активные элементы, полученные из халькогенидных кристаллов, позволят осуществить перестройку излучения в ИК-диапазон от 4,5 до 9,5 мкм. Оптическая схема резонатора ПГС аналогична схемам, приведенным в ранних работах [11, 12], с некоторыми модификациями, в зависимости от геометрических параметров нелинейного кристалла и оптических свойств зеркал резонатора.

Конструктивные параметры ИК-ПГС представлены следующим образом: длина резонатора варьируется от $L = 60$ – 80 см, среднегеометрический коэффициент отражения зеркал $R = 0,6$.

Результаты расчета спектральной ширины для каждой соответствующей длины волны излучения соответствующей моды представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчет спектральной ширины выходного излучения ИК-ПГС

λ , мкм	λ_0 , мкм	$\Delta\vartheta$, см^{-1}
2,2	2,1	4,5351
2,6	2,5	3,2
3,2	3,1	2,0812
3,6	3,5	1,6327
5	4,9	0,0833
5,4	5,3	0,0712
6,2	6,1	0,5375
6,6	6,5	0,4734
7	6,9	0,4201
7,4	7,3	0,3753
7,8	7,7	0,3373
8	7,9	0,3205

Зависимость спектральной ширины излучения от длины волны во всем диапазоне перестройки представлена на рис. 1.

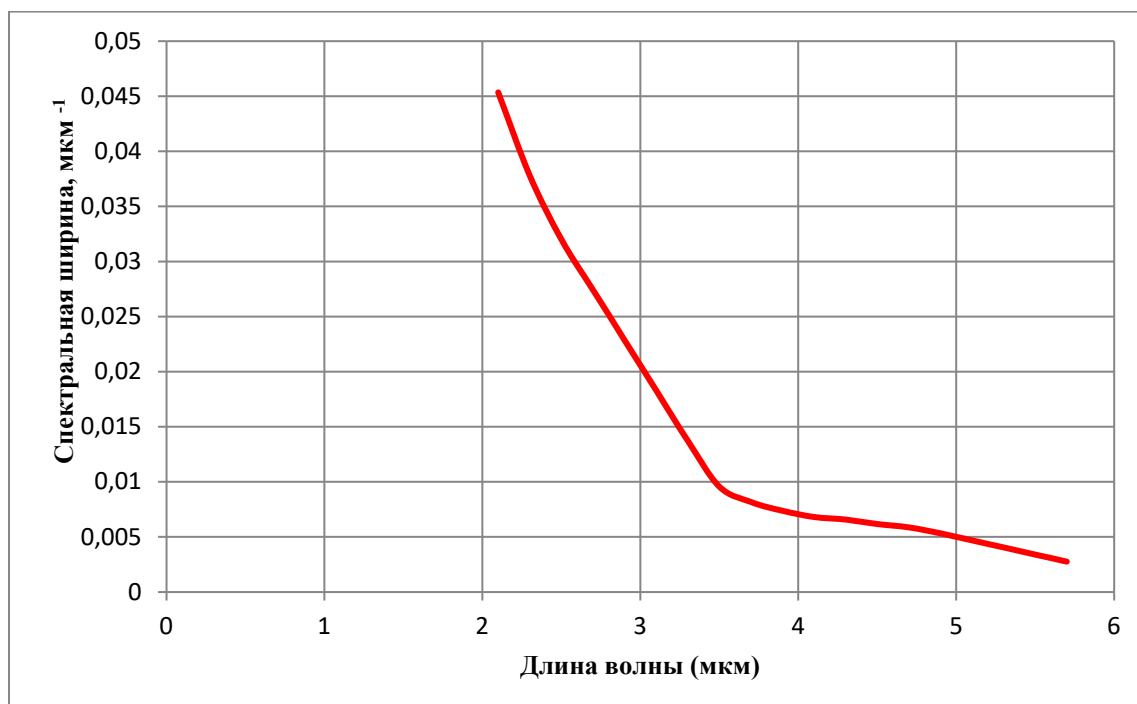


Рис. 1. График зависимости спектральной ширины от длины волны параметрического генератора света

Расчет добротности Q производился по формуле

$$Q = \frac{2\pi L}{\lambda} \cdot \frac{1}{1-R}$$

Результаты представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Параметры для расчета добротности

$\Delta\lambda$, мкм	L , м	R	$\frac{1}{1-R}$	$2\pi L$	$\frac{2\pi L}{1-R}$
0,2 в диапазоне 2÷8	0,8	0,6	2,5	5,024	12,56

Таблица 3

Добротность выходного излучения ИК-ПГС

λ , мкм	$Q \cdot 10^6$	λ , мкм	$Q \cdot 10^6$	λ , мкм	$Q \cdot 10^6$	λ , мкм	$Q \cdot 10^6$
2	6,28	3,6	3,48	5,2	2,41	6,8	1,84
2,2	5,70	3,8	3,30	5,4	2,32	7	1,79
2,4	5,23	4	3,14	5,6	2,24	7,2	1,74
2,6	4,83	4,2	2,99	5,8	2,16	7,4	1,69
2,8	4,48	4,4	2,85	6	2,09	7,6	1,65
3	4,18	4,6	2,73	6,2	2,02	7,8	1,61
3,2	3,92	4,8	2,61	6,4	1,96	8	1,57
3,4	3,69	5	2,51	6,6	1,90		

На рис. 2 представлена зависимость добротности от длины волны.

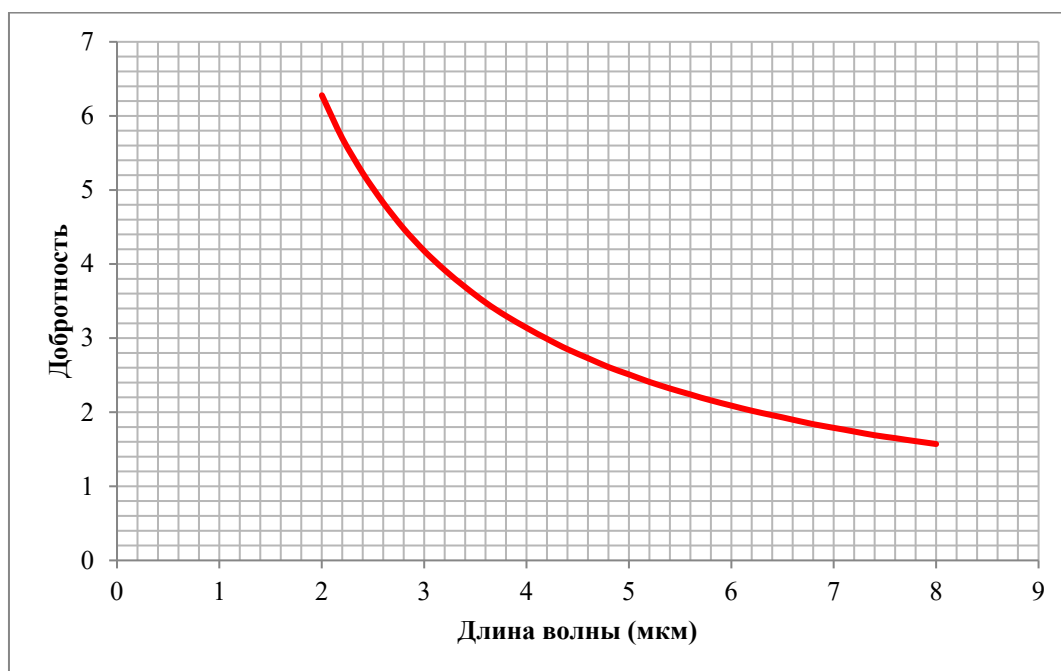


Рис. 2. График зависимости добротности

Схема расходимости лазерного пучка представлена на рис. 3.

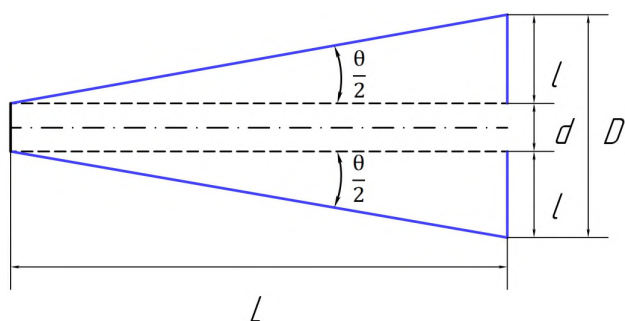


Рис. 3. Схема расходимости лазерного пучка

Изменение радиуса пучка в зависимости от расстояния можно описать, используя следующую зависимость:

$$R^2 = R_0^2 + \left(\frac{L}{kR_0}\right)^2,$$

где волновое число k определяется как

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Угол расходимости параметрического генератора рассчитан при помощи стандартных формул геометрии и физического приближения тангенса и синуса при малых значениях угла

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) \approx \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\theta}{2} = \frac{l}{L} = \frac{D-d}{2L} = \frac{R-R_0}{L},$$

где R – радиус пучка; R_0 – радиус пучка в перетяжке.

Расчет полного угла расхождения определялся, исходя из следующей зависимости:

$$\theta = 2 \cdot \frac{R-R_0}{L}.$$

Результаты расчетов расходимости пучка в зависимости от расстояния $L = 1$ м, $L = 10$ м, $L = 50$ м и длины волны параметрического генератора в диапазоне $\lambda = 2-8$ мкм. Радиус пучка в перетяжке $R_0 = 2$ мм представлены в табл. 4.

По результатам расчетов построены графики зависимости угла расходимости от длины волны на различных расстояниях (рис. 4).

Таблица 4

Расходимость выходного излучения в зависимости от длины волны

λ , мкм	$k \cdot 10^6$, см ⁻¹	$L = 1$ м		$L = 10$ м		$L = 50$ м	
		R , мм	θ , мрад	R , мм	θ , мрад	R , мм	θ , мрад
2	3,14	2,0063	0,022	2,5565	0,019	8,2091	0,043
2,5	2,51	2,0099	0,035	2,8217	0,029	10,1512	0,057
3	2,09	2,0142	0,05	3,1153	0,039	12,1090	0,071
3,5	1,79	2,0193	0,067	3,4301	0,05	14,0759	0,084
4	1,57	2,0252	0,088	3,7606	0,061	16,0487	0,098
4,5	1,39	2,0318	0,11	4,1032	0,073	18,0253	0,11
5	1,25	2,0392	0,14	4,4551	0,086	20,0047	0,13
5,5	1,14	2,0474	0,17	4,8141	0,098	21,9861	0,14
6	1,04	2,0563	0,2	5,1788	0,11	23,9689	0,15
6,5	0,96	2,0659	0,23	5,5482	0,12	25,9530	0,17
7	0,89	2,0762	0,27	5,9212	0,14	27,9379	0,18
7,5	0,83	2,0872	0,3	6,2974	0,15	29,9236	0,19
8	0,78	2,0990	0,35	6,6760	0,16	31,9099	0,21

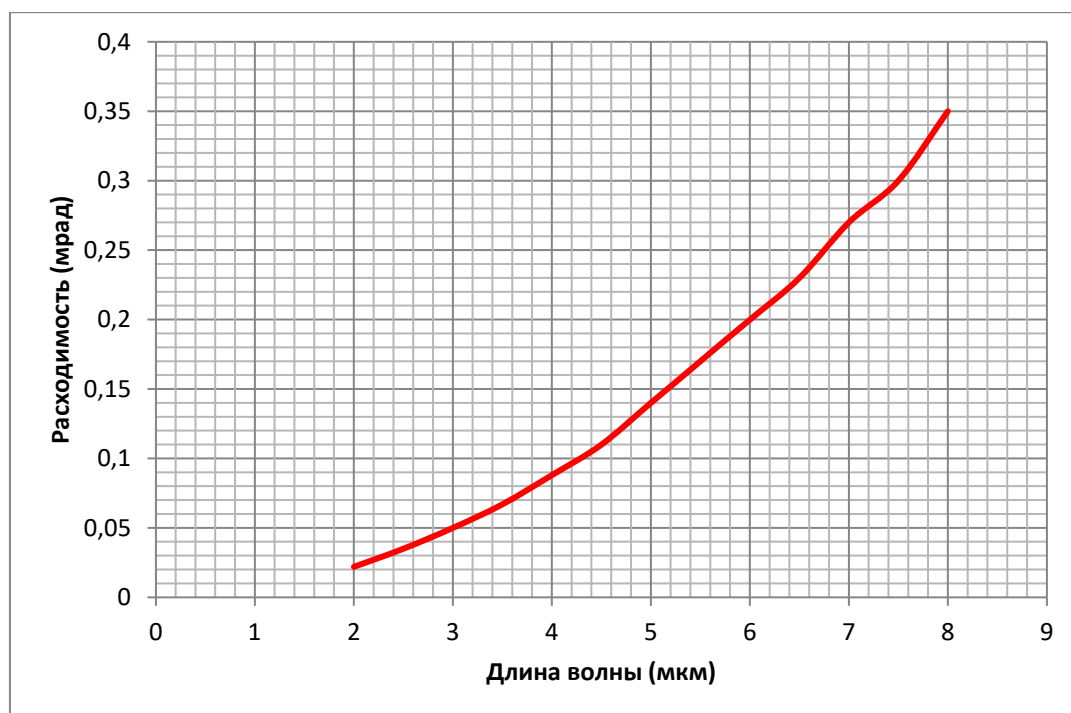


Рис. 4. График зависимости угла расходимости от длины волны на расстоянии $L = 1$ м

Заклучение

Таким образом, исследование амплитудно-спектральных и пространственных характеристик ИК-ПГС позволило определить оптимальные значения спектральной ширины излучения ($\leq 1 \text{ см}^{-1}$) и добротности ($\geq 4 \cdot 10^6$), а также подтвердить постоянство угла расходимости ($\leq 0,1$ мрад) от длины волны излуче-

ния в диапазоне 2–8 мкм. Данные параметры позволяют сделать вывод о перспективности использования описанной конструкции ПГС для многих спектроскопических задач.

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boyko A. A., Marchev G. M., Petrov V., Pasiskevicius V., Kolker D. B., Zukauskas A., Kostyukova N. Y. Intracavity-pumped, cascaded AgGaSe₂ optical parametric oscillator tunable from 5.8 to 18 μm // Optics Express. – 2015. – Vol. 23. – P. 33460–33465.
2. Vodopyanov K. L., Ganikhanov F., Maffettone J. P., Zwieback I., Ruderman W. ZnGeP₂ optical parametric oscillator with 3.8–12.4 μm tunability // Optics Letters. – 2000. – Vol. 25. – P. 841–843.
3. Chen Y., Liu G. Y., Yang C., Yao B. Q., Wang R. X., Mi S. Y., Yang K., Dai T. Y., Duan X. M., Ju Y. L. 1 W, 10.1 μm , CdSe optical parametric oscillator with continuous-wave seed injection // Optics Letters. – 2020. – Vol. 45. – P. 2119–2122.
4. Zhao B. R., Chen Y., Yao B. Q., Yao J. Y., Guo Y. W., Wang R. X., Dai T. Y., Duan X. M. High-efficiency, tunable 8-9 μm BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator pumped at 2.1 μm // Optical Materials Express. – 2018. – Vol. 8. – P. 3332–3337.
5. Mackanos M. A. W., Simanovskii D., Joos K. M., Schwettman H. A., Jansen E. D. Mid infrared optical parametric oscillator (OPO) as a viable alternative to tissue ablation with the free electron laser (FEL) // Lasers in Surgery and Medicine. – 2007. – Vol. 39. – P. 230–236.
6. Bigotta S., Stoppler G., Schoner J., Schellhorn M., Eichhorn M. Novel non-planar ring cavity for enhanced beam quality in high-pulse-energy optical parametric oscillators // Optical Materials Express. – 2014. – Vol. 4, No. 3. – P. 411–423.

7. Gerhards M. High energy and narrow bandwidth mid IR nanosecond laser system // *Optics Communications*. – 2004. – Vol. 241. – P. 493–497.
8. Дмитриев В. Г. Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика: генераторы второй гармоники и параметрические генераторы света. – М. : Радио и связь, 1982. – 352с.
9. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. – М. : Наука, 1990 – 264 с.
10. Айрапетян В. С., Макеев А. В. Параметрический генератор света на кристалле HGS с плавной перестройкой длины волны в диапазоне 4,75–9,07 мкм // *Оптика атмосферы и океана*. – 2021. – Т. 34. № 01. – С. 57–60. – DOI 10.15372/AOO20210107.
11. Айрапетян В. С., Маганакова Т. В. Обнаружение и измерение параметров наркотических веществ с помощью перестраиваемого ИК-лазера // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.)*. – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 199–204.
12. Айрапетян В. С., Маганакова Т. В. Лазерное зондирование в задаче обнаружения и измерения параметров наркотических веществ // *Вестник СГГА*. – 2014. – Вып. 2 (26). – С. 40–46.
13. Айрапетян В. С., Маганакова Т. В. Расчет концентрации наркотических веществ методом дифференциального поглощения и рассеяния // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.)*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 141–147.

Об авторах

Валерик Сергеевич Айрапетян – доктор технических наук, заведующий кафедрой специальных устройств, инноватики и метрологии.

Александр Викторович Макеев – ассистент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии.

Получено 24.10.2022

© В. С. Айрапетян, А. В. Макеев, 2022

Optimization of spectral and geometric parameters of OPO in the mid-IR range

V. S. Ayrapetyan¹, A. V. Makeev^{1}*

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: makeeffsan@yandex.ru

Abstract. The results of computational and experimental studies of the parameters of a parametric light generator in the mid-IR range are presented. One of the main problems of OPO in the near and mid-IR range (1-8 μm) is the high divergence of the output radiation. The purpose of this study is to improve the spectral and amplitude-spatial characteristics for the out-of-cavity scheme of the IR-OPO ring resonator. In an in vitro experiment simulating the radiation of an IR parametric laser, the dependences of the spectral width and quality factor of the radiation of a tunable laser frequency on the wavelength were obtained. It is shown that the improved optical-geometrical parameters of the out-of-zone OPO scheme made it possible to achieve high values of the spectral radiation width ($\leq 1 \text{ cm}^{-1}$) and quality factor (≥ 4.106). It is shown that such a developed scheme of an out-of-cavity OPO based on new chalcogenide crystals will expand its application in the mid- and far-IR ranges.

Keywords: nonlinear crystal, lidar, tunable light generator, oxide crystals, chalcogenide crystals, selenide crystals, ring resonator, spectral width of radiation, infrared radiation

REFERENCES

1. Boyko, A. A., Marchev, G. M., Petrov, V., Pasiskevicius, V., Kolker, D. B., Zukauskas, A., & Kostyukova, N. Y. (2015). Intracavity-pumped, cascaded AgGaSe₂ optical parametric oscillator tunable from 5.8 to 18 μm . *Optics Express*, 23, 33460–33465.

2. Vodopyanov, K. L., Ganikhanov, F., Maffetone, J. P., Zwieback, I., & Ruderman, W. (2000). ZnGeP₂ optical parametric oscillator with 3.8–12.4 μm tenability. *Optics Letters*, 25, 841–843.
3. Chen, Y., Liu, G. Y., Yang, C., Yao, B. Q., Wang, R. X., Mi, S. Y., Yang, K., Dai, T. Y., Duan, X. M., & Ju, Y. L. (2020). 1 W, 10.1 μm, CdSe optical parametric oscillator with continuous-wave seed injection. *Optics Letters*, 45, 2119–2122.
4. Zhao, B. R., Chen, Y., Yao, B. Q., Yao, J. Y., Guo, Y. W., Wang, R. X., Dai, T. Y., & Duan, X. M. (2018). High-efficiency, tunable 8-9 μm BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator pumped at 2.1 μm. *Optical Materials Express*, 8, 3332–3337.
5. Mackanos M. A. W., Simanovskii D., Joos K. M., Schwettman H. A., & Jansen E. D. (2007). Mid infrared optical parametric oscillator (OPO) as a viable alternative to tissue ablation with the free electron laser (FEL). *Lasers in Surgery and Medicine*, 39, 230–236.
6. Bigotta, S., Stoppler, G., Schoner, J., Schellhorn, M., & Eichhorn, M. (2014). Novel non-planar ring cavity for enhanced beam quality in high-pulse-energy optical parametric oscillators. *Optical Materials Express*, 4(3), 411–423.
7. Gerhards, M. (2004). High energy and narrow bandwidth mid IR nanosecond laser system. *Optics Communications*, 241, 493–497.
8. Dmitriev, V. G., & Tarasov, L. V. (1982). *Prikladnaya nelineynaya optika: Generatory vtoroy garmoniki i parametricheskie generatory sveta [Applied nonlinear optics: Second harmonic generators and parametric light generators]*. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 352 p. [in Russian].
9. Ananiev, Yu. A. (1990). *Opticheskie rezonatory i lazernye puchki [Optical resonators and laser beams]*. Moscow: Nauka Publ., 264 p. [in Russian].
10. Airapetyan, V. S., & Makeev, A. V. (2021). An optical parametric oscillator based on an HGS crystal with smooth wavelength tuning in the range 4.75–9.07 μm. *Optika atmosfery i okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 34(01), 57–60. doi: 10.15372/AOO20210107 [in Russian].
11. Airapetyan, V. S., & Maganakova, T. V. (2014). Detection and measurement of parameters of narcotic substances using a tunable IR laser. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. SibOptika-2014 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 2. SybOptics-2014]* (pp. 199–204). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
12. Airapetyan, V. S., & Maganakova, T. V. (2014). Laser probing in the problem of detecting and measuring the parameters of narcotic substances. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 2(26), 40–46 [in Russian].
13. Airapetyan, V. S., & Maganakova, T. V. (2015). Calculation of the concentration of narcotic substances by the method of differential absorption and scattering. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2015: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. SibOptika-2015 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 1. SybOptics-2015]* (pp. 141–147). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

Author details

Valerik S. Airapetyan – D. Sc, Head of the Department of Special Devices, Innovation and Metrology.
Alexander V. Makeev – Assistant, Department of Special Devices, Innovation and Metrology.

Received 24.10.2022

© V. S. Airapetyan, A. V. Makeev, 2022