

УДК 621.311.243 (571)

DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-163-169

Влияние излучения YAG:Nd³⁺-лазера накачки на генерационные характеристики внрезонаторного параметрического генератора света

В. С. Айрапетян¹, А. В. Макеев¹✉

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

e-mail: makeeffsan@yandex.ru

Аннотация. Представлена методика расчетного и экспериментального исследований характеристик YAG:Nd³⁺- лазера с ламповой накачкой. Полученные значения расходимости излучения $\theta = 1,3$ мрад и выходной энергии импульса до 180 мДж позволяют говорить об эффективности его использования в качестве лазера накачки для внрезонаторного преобразования его длины волны в средний и дальний ИК диапазоны на нелиейнооптическом элементе из оксидных и халькогенидных кристаллов. Описаны основные особенности разработанной экспериментальной установки YAG:Nd³⁺ – лазера с неустойчивым резонатором и методики расчета. Оценено влияние возникающей в активном элементе термической линзы на качество выходного излучения лазера накачки. Показано, что при улучшении спектральной ширины излучения лазера накачки на 10 % становится возможным достичь спектральной ширины параметрического генератора света менее 1см⁻¹.

Ключевые слова: YAG:Nd³⁺-лазер накачки, перестройка длины волны излучения, параметрический генератор света, нелинейно-оптический кристалл, амплитудные характеристики лазерного излучения

Для цитирования:

Айрапетян В. С., Макеев А. В. Влияние излучения YAG:Nd³⁺-лазера накачки на генерационные характеристики внрезонаторного параметрического генератора света // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 3. – С. 163–169. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-163-169

Введение

Целью статьи является поиск эффективных технических решений для совершенствования одного из методов перестройки длины волны лазерного излучения, а именно параметрического преобразования излучения.

В последнее время происходит активное развитие высокоэффективных источников лазерного излучения, таких как параметриче-

ские генераторы света (ПГС). Развитие данной технологии позволило реализовать плавную перестройку длины волны основного излучения, а также осуществлять перестройку дискретным способом, что подтверждается большим количеством публикуемых работ по этой тематике [1–4]. К таким лазерам предъявляют повышенные требования к качеству излучения; их применение особенно актуально для лидарных устройств дистанцион-

ного мониторинга состояния Земли и атмосферы, в устройствах связи, волоконной оптике, устройствах военного назначения. Применительно к разработанному авторами ранее внрезонаторному ПГС на кристаллах LiNbO_3 и HGS [5–7] наиболее оптимальным лазером накачки можно считать импульсный твердотельный лазер на кристалле YAG:Nd^{3+} с дополнительно реализованной высокоэффективной модуляцией добротности. С учетом того, что характеристики источника накачки напрямую влияют на эффективность перестройки, а также на качество выходного излучения работающего на его основе ПГС, задачей данного исследования был поиск путей совершенствования его характеристик.

Описание проблемы исследования

В процессе работы лазера происходит значительный спад характеристик по причине образования термооптических неоднородностей в объеме активного элемента из-за его нагрева от излучения ламповой накачки [8–10]. В данном случае около 10 % от мощности газоразрядной лампы конвертируется в нагрев активного элемента. Решением такой проблемы может стать монтаж дополнительного активного охлаждения кристалла YAG:Nd^{3+} , однако это решение также создает неустойчивость в работе резонатора из-за возникновения вибраций вследствие работы насосов и циркуляции хладагента охлаждающей установки.

Следствием возникновения градиента температуры в объеме кристалла YAG:Nd^{3+} является происходящая деформация торцов активного элемента, а также появление механических напряжений и анизотропности его оптических свойств [11, 12]. Данные факторы позволяют сделать вывод, что активный элемент, который подвергается воздействию излучения ламповой накачки большой мощности, может быть рассмотрен в виде термической линзы. При этом изменение мощности накачки вызывает смещение фокальных точек, образованных термической линзой активного элемента. При разработке оптической схемы неустойчивого резонатора были исследованы причины энергетической и спектральной нестабильности выходных характе-

ристик излучения и установлены предельно допустимые значения напряжения на импульсных лампах и скорости прокачки хладагента охлаждающей установки.

Разработка импульсного лазера накачки для внрезонаторного ПГС

Конструктивно для реализации лазера накачки использовалась схема неустойчивого резонатора. Такое решение было принято в связи с необходимостью генерации высокой выходной энергии в импульсе, с одновременным улучшением характеристики и спектральной ширины излучения. Также учитывалось, что разрабатываемый YAG:Nd^{3+} -лазер предназначен для накачки ПГС лидарного комплекса, излучение которого проходит расстояния в несколько километров в открытой атмосфере Земли, следовательно, расходимость излучения не должна превышать 1 мрад.

Схема конструкции исследуемого резонатора лазера YAG:Nd^{3+} представлена на рис. 1.

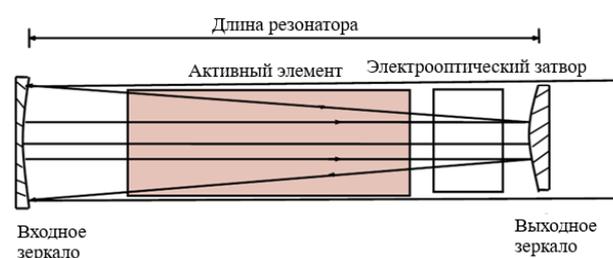


Рис. 1. Схема конструкции резонатора YAG:Nd^{3+} -лазера

Генерация осуществлялась при использовании активного элемента, который изготовлен из кристалла иттрий-алюминиевого граната YAG с примесью ионов неодима, атомарная концентрация которого составляла приблизительно 1,2 %. Активный элемент изготовлен в виде цилиндра длиной 100 мм и диаметром 8 мм. В качестве модулятора добротности использован электрооптический затвор, изготовленный на кристалле дидейтерофосфата калия DKDP, с нанесением на боковые грани кристалла токопроводящих электродов. Входное и выходное зеркала резонатора изготовлены в виде вогнутых пластин из бесцветного стекла К8 с радиусами кривизны

860 и 640 мм, а также диаметром апертуры 25 и 15 мм соответственно. Пропускательно-отражательные свойства зеркал оценивались на длине волны $\lambda = 1,064$ мкм. Коэффициенты отражения составили 86,5 % для выходного зеркала и 99,5 % для входного зеркала. Импульсная лампа накачки марки ИМП 7,5/90 вместе с активным элементом из YAG:Nd³⁺ смонтированы внутри цилиндрического полого диффузного отражателя.

Экспериментальная установка

Измерение величины и качества термической линзы активного элемента выполнялось на стенде, схема которого представлена на рис. 2.

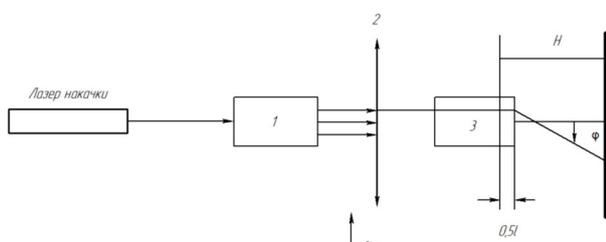


Рис. 2. Схема стенда для определения значения оптической силы термической линзы, возникающей вследствие нагрева активного элемента из кристалла YAG:Nd³⁺

Излучение лазера преобразуется в телескопической системе 1 и далее проходит сквозь диафрагму с входным зрачком 0,8 мм 2, которая смонтирована таким образом, что возможно осуществлять позиционирование в двух плоскостях; размер входного зрачка значительно меньше диаметра кристалла активного элемента 3 $d = 8$ мм. Измерение оптической силы тепловой линзы в сечении активного элемента и величины aberrаций выполнялось путем перемещения диафрагмы на величину a_1 с одновременным детектированием координат луча a_2 лазера на приемном устройстве 4.

Расчет изменения кривизны волнового фронта выполнялся исходя из зависимости

$$R_T = \frac{IT_0T}{2V\delta}. \quad (1)$$

При этом для случая отсутствия каких-либо aberrаций в оптической системе лазера накачки справедливо соотношение

$$a_1 + a_2 = \varphi H = x_1(R_T H). \quad (2)$$

В формулах (1), (2) φ – угол отклонения луча от горизонтальной оси; H – расстояние от выходной грани до приемного устройства; $l = 100$ мм – длина активного элемента лазера; δ – коэффициент теплопроводности активного элемента; T – уровень вносимых термооптических искажений, для кристалла из YAG:Nd³⁺ равен $82 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$; T_0 – полная мощность тепловыделения в активном элементе; V – объем используемого активного элемента.

Для измерения энергетических и спектральных характеристик излучения YAG:Nd³⁺-лазера был сконструирован экспериментальный стенд спектрофотометра, принципиальная схема которого представлена на рис. 3.

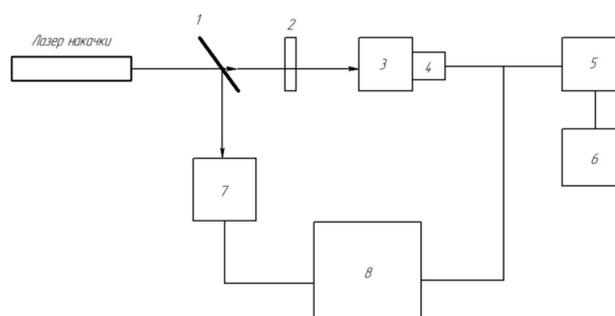


Рис. 3. Схема спектрофотометрического стенда

Стенд состоит из исследуемого лазера накачки YAG:Nd³⁺, светоделителя 1, светофильтра 2, монохроматора МДР-12 3, фотоприемного устройства с диапазоном работы 0,8–2,4 мкм 4, аналого-цифрового преобразователя 5, персонального компьютера 6 со специализированным программным обеспечением, фотоэлектронного умножителя марки 7 ФЭУ-83 и высокоскоростного двухканального осциллографа 8.

Данная установка позволяет выполнять измерения следующих величин: длительности импульса, длины волны и спектральной ширины излучения лазера. Результаты измерений: длительность импульса по полувысоте $\tau_u = 20$ нс,

длина волны излучения $\lambda = 1,06415$ мкм, спектральная ширина $\Delta\lambda = 1,93 \cdot 10^{-3}$ Å.

Результаты и обсуждение

Экспериментально исследовалась зависимость выходной энергии излучения лазера от длины волны, а также измерялась угловая расходимость, (2θ) излучения лазера накачки в точке, где полная интенсивность падает до уровня 0,5. Произведена оценка влияния диаметра диафрагмы в фокальной плоскости линзы на выходные характеристики YAG:Nd³⁺-лазера.

Для оценки расходимости выходного излучения YAG:Nd³⁺-лазера в области перетяжки луча выполнялось измерение поперечного распределения интенсивности. Область перетяжки располагалась в фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием $F = 1$ м.

Были получены следующие результаты: максимально эффективная генерация, равная 42 %, была достигнута при использовании зеркал с коэффициентом пропускания на уровне 86,5 %, а также выводе лазера в импульсно-периодический режим работы. Частота повторения импульсов составляла 30 Гц. Максимальная выходная энергия, которой удалось достичь для данной конструкции лазера, составила 180 мДж. Для описанной конструкции характерно изменение траектории пучка внутри резонатора при внеосевом прохождении толстых линз и падении пучка на линзу под различными углами, величина которых отличается от нормального. Полный угол расходимости выходного пучка лазера накачки составил приблизительно 1,3 мрад, относительная погрешность измерения составила 4 %. В ходе экспериментов было установлено, что на величину расходимости не оказывало существенного влияния изменение выходной энергии излучения лазера, а также коэффициент отражения выходного зеркала.

Экспериментальное измеренное значение параметра качества выходного излучения (коэффициент M^2) равно примерно 1,7, что близко соответствует значению одномодового режима. Графически результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 4 и 5.

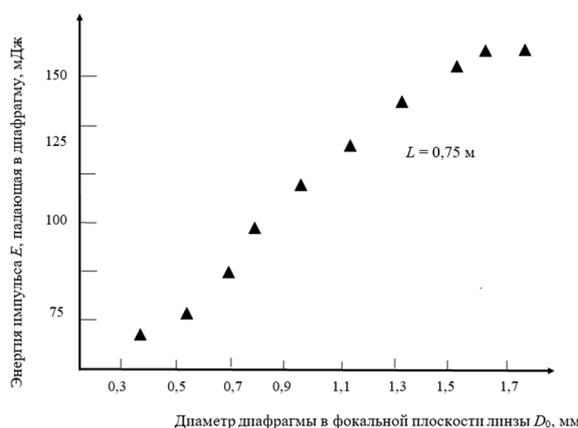


Рис. 4. График влияния диаметра диафрагмы в фокальной плоскости линзы на энергетические характеристики выходного излучения YAG:Nd³⁺-лазера

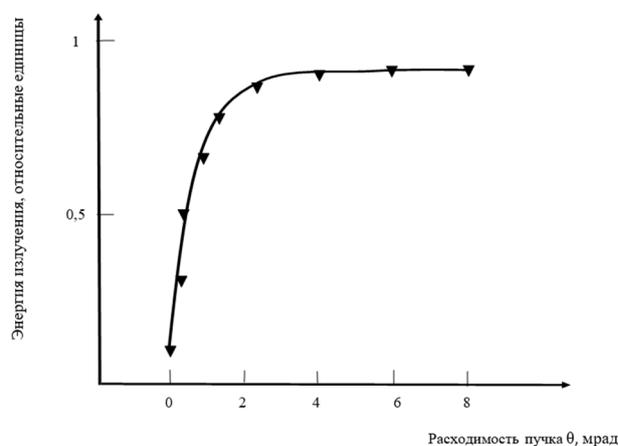


Рис. 5. График расходимости выходного излучения

Выводы

Разработана оптическая схема телескопического резонатора YAG:Nd³⁺-лазера накачки. Проведено комплексное экспериментальное исследование генерационных характеристик. По результатам экспериментов сделан вывод о том, что уменьшение числа поперечных мод не оказало влияния на однородность поля, также данный фактор не снизил энергию выходного излучения лазера накачки. Получены следующие характеристики: рабочая длина волны $\lambda = 1,06415$ мкм, максимальное значение выходной энергии в импульсе равно 180 мДж, расходимость излучения на уровне 1,5 мрад,

частота следования световых импульсов 30 Гц. Такие характеристики лазера накачки существенно улучшают энергетические и пространственно-временные характеристики ПГС, а также позволяют повысить эффективность преобразования основного излучения на длине волны λ в ближний и средний инфракрасный диапазон, а именно 1,41–4,24 мкм, до уровня, равного приблизительно 29 %.

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).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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 // *Opt. Materials Express*. – 2014. – Vol. 4, No. 3. – P. 411–423. – DOI 10.1364/OME.4.000411.
2. 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. 10.1 μm CdSe optical parametric oscillator with continuous-wave seed injection // *Opt. Lett.* – 2020. – Vol. 45. – P. 2119–2122. – DOI 10.1364/OL.391547. – EDN AHSMVY.
3. 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 Surg. Med.* – 2007. – Vol. 39. – P. 230–236. – DOI 10.1002/lsm.20461. – EDN MHRSIR.
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 // *Opt. Mater. Express*. – 2018. – Vol. 8. – P. 3332–3337. – DOI 10.1364/OME.8.003332. – EDN YOEFMW.
5. Айрапетян В. С., Широкова Т. А., Пасько П. Г. ИК параметрический лазер с высокой эффективностью излучения во всем диапазоне перестройки частоты // *Вестник НГУ. Сер. Физика*. – 2013. – Т. 10, № 4. – С. 6–10.
6. Айрапетян В. С., Makeev A. B. 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, № 1. – С. 57–60. – DOI 10.15372/AOO20210107.
7. Hayrapetyan V. S., Makeev A. V., Shaburova A. V. Optical parametric oscillator on hgs crystal with 5–9 mkm frequency reset // *Proceedings of the SPIE*. – 2019. – Vol. 11208. – 5 pp. – DOI 10.1117/12.2540427.
8. Ананьев Ю. А., Шестобитов В. Е. Влияние краевых эффектов свойства неустойчивого резонатора // *Квантовая электроника*. – 1971. – № 3. – С. 82.
9. Емельянова Ю. В., Туркевич Л. Г., Маркова Г. В. О получении равномерного распределения интенсивности в лазерном излучении // *Письма в ЖТФ*. – 1977. – Т. 3, вып. 8. – С. 367–369.
10. Guilian G., Park Y. K., Byer R. I. Radial birefringen element and its applications to laser resonator design // *Opt. Lett.* – 1980. – V. 5. – P. 491.
11. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. – М.: Мир, 1982. – 355 с.
12. Anan'ev Y. A. Laser Resonators and Beam Divergence Problem – 1992. – P. 442. – DOI 10.1201/9781003062899.

Об авторах

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

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

Получено 19.02.2025

© В. С. Айрапетян, А. В. Makeev, 2025

Influence of YAG:Nd³⁺-Pump Laser on the Generation Characteristics of an Extracavity Optical Parametric Oscillator

V. S. Ayrapetyan¹, A. V. Makeev¹✉

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

e-mail: makeeffsan@yandex.ru

Abstract. The paper presents a calculation and experimental study technique for the characteristics of a lamp-pumped YAG:Nd³⁺ laser. The obtained values of radiation divergence $\theta = 1.3\text{--}1.5$ mrad and output pulse energy up to 180 mJ suggest its efficiency as a pump laser for extracavity wavelength conversion to the mid – and far – IR ranges on a nonlinear optical element made of oxide and chalcogenide crystals. The main features of the developed experimental setup for a YAG:Nd³⁺ laser with an unstable resonator and the calculation technique are described. The influence of the thermal lens arising in the active element on the quality of the output radiation of the pump laser is estimated. It is shown that by improving the spectral width of the pump laser radiation by 10%, it becomes possible to achieve a spectral width of the parametric light oscillator of less than 1 cm^{-1} .

Keywords: YAG:Nd³⁺ – pump laser, optical parametric oscillator, wavelength tuning, amplitude characteristics of laser radiation, nonlinear optical crystal

REFERENCE

1. 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. *Opt. Materials Express*. Vol. 4, No. 3. P. 411–423. DOI 10.1364/OME.4.000411.
2. 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) 10.1 μm , CdSe optical parametric oscillator with continuous-wave seed injection. *Opt. Lett.* Vol. 45. P. 2119–2122. DOI 10.1364/OL.391547. EDN AHSMVY.
3. 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 Surg. Med.* Vol. 39. P. 230–236. DOI 10.1002/lsm.20461. EDN MHR SIR.
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 . *Opt. Mater. Express*. 2018. Vol. 8. P. 3332–3337. DOI 10.1364/OME.8.003332. EDN YOEFMW.
5. Ayrapetyan, V. S., Shirokova, T. A., Pas'ko, P. G. (2013) IR parametric laser with high radiation efficiency in the entire frequency tuning range *Vestnik NGU. Seriya: Fizika. [Bulletin of NSU. Series: Physics]*, Vol. 10, No. 4. P. 6–10 [in Russian].
6. Ayrapetyan, V. S., Makeev, A. V. (2021) Parametric light oscillator on an HGS crystal with smooth wavelength tuning in the range of 4.75–9.07 μm . *Optika atmosfery i okeana [Optics of the atmosphere and ocean]* Vol. 34. No. 01. P. 57–60. DOI 10.15372/AOO20210107 [in Russian].
7. Ayrapetyan V., Makeev A. (2019) Optical parametric oscillator on hgs crystal with 5-9 mkm frequency reset *Proceedings of the SPIE*. 2019. Vol. 11208. 5 pp. DOI 10.1117/12.2540427.
8. Ananyev, Yu. A. Shestobitov V. E. (1971) Influence of edge effects on the properties of an unstable resonator, *Kvantovaya jelektronika [Quantum Electronics]*. No. 3. P. 82 [in Russian].
9. Emelyanova Yu. V., Turkevich L. G., Markova G. V. (1977) On obtaining a uniform intensity distribution in laser radiation, *Pis'ma v zhurnal tehnikeskoy fiziki [Letters to the Journal of Technical Physics]* Vol. 3, issue. 8. P. 367–369 [in Russian].
10. Guilian, G., Park, Y. K., Byer, R. I. (1980) Radial birefringent element and its applications to laser resonator design. *Opt. Lett.* V. 5. p. 491.

11. Ananyev, Y. A. (1982) *Opticheskie rezonatory i problema rashodimosti lazernogo izluchenija* [Optical resonators and the problem of laser radiation divergence] Moscow Mir, 355 p.: ill. [in Russian].
12. Anan'ev Y. A. (1992) «Laser Resonators and Beam Divergence Problem» Hilger, N. Y.

Author details

Valerik S. Ayrapetyan – D. Sc., Professor, Head of the Department of Special Devices of Innovation and Metrology.

Aleksander V. Makeev – Assistant of the Department of Special Devices, Innovations and Metrology.

Received 19.02.2025

© *V. S. Ayrapetyan, A. V. Makeev, 2025*