

## Перестраиваемый лазер на александрите для лидарных систем

Ю.Н. Панченко<sup>✉1</sup>, А.В. Пучикин<sup>1</sup>, М.В. Андреев<sup>1</sup>,  
И.Н. Коновалов<sup>1</sup>, Е.В. Горлов<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 31.08.2023;  
после доработки 02.10.2023;  
принята к печати 25.01.2024

Развитие лазерных технологий приводит к повышению требований, предъявляемых к разрабатываемым лазерам, генерирующим узкополосное излучение с различными длинами волн. Повышается значимость использования перестраиваемых по длинам волн диодных и вибронных лазеров, имеющих широкополосные контуры усиления. В работе показана возможность формирования в твердотельном лазере на александрите высококогерентного излучения при использовании оригинального составного резонатора, включающего в себя дополнительный внешний дисперсионный резонатор. Приведены результаты экспериментальных исследований по определению условий формирования в таком резонаторе узкополосного (менее 20 пм) излучения с возможностью плавной перестройки длины волны генерации в спектральном диапазоне 740–780 нм. Продемонстрировано получение в александритовом лазере узкополосной генерации с энергией излучения 30 мДж и длительностью импульса 35 нс. Созданный компактный узкополосный александритовый лазер может эффективно заменять параметрические генераторы и Ti:Sapphire-лазеры в лидарных системах, работающих в диапазоне 700–850 нм.

*Ключевые слова:* лазер на александрите, дисперсионный резонатор, когерентное излучение, короткий импульс; alexandrite laser, dispersive resonator, coherent radiation, short pulse.

### Введение

Лазер на александрите благодаря наличию широкополосного контура усиления от 700 до 858 нм [1, 2] имеет большой потенциал применений в различных прикладных научных исследованиях, а также в современных технологических приложениях, связанных с разработкой лазерных лидарных систем, и медицине. Однако данная особенность активной среды александрита не позволяет использовать его для ряда технологий, требующих узкополосного излучения [3].

Основным способом получения когерентного излучения в лазере является применение дисперсионного резонатора. Однако из-за высокого уровня в нем селективных и неселективных потерь существенно уменьшается выходная энергия излучения

и сужается спектральная область перестройки линии генерации. Это приводит к тому, что при формировании узкополосного излучения в мощных усилительных системах в роли задающего генератора используются другие типы лазеров, что существенно усложняет эти системы. Таким образом, существует потребность в разработке новых технических решений для формирования мощного когерентного излучения в одномодульных лазерах.

В работах [3–5] было показано, что при формировании в александритовом лазере узкополосного излучения, как правило, используются интерференционно-поляризационные фильтры Лео с малыми неселективными потерями. Тем не менее небольшой коэффициент усиления активной среды ( $g \sim 0,05 \text{ см}^{-1}$ ) и потери в таком резонаторе повышают порог генерации и существенно снижают энергию выходного излучения. Интересный подход к формированию когерентного излучения был предложен в публикации [6], в которой авторы использовали оптический составной резонатор, включающий в себя основной резонатор (ОР) и интегрированный с ним внешний селективный резонатор (ВСР).

\* Юрий Николаевич Панченко (yu.n.panchenko@mail.ru); Алексей Владимирович Пучикин (apuchikin@mail.ru); Михаил Владимирович Андреев (andreevmv\_86@mail.ru); Иван Николаевич Коновалов (ivan@lgl.hcei.tsc.ru); Евгений Владимирович Горлов (gorlov\_e@mail.ru).

Разработка новых методов формирования короткоимпульсного когерентного излучения в лазере на александрите, а также возможность получения более коротковолнового излучения за счет дополнительной генерации высших гармоник позволяют эффективно применять их в лидарных системах.

Цель работы — изучение возможности формирования высококогерентного излучения при использовании оригинального составного резонатора, включающего в себя дополнительный внешний дисперсионный резонатор.

### Экспериментальная установка и методики измерений

Экспериментальные исследования проводились с помощью лазера на александрите. Кристалл имел форму стержня длиной 90 мм и диаметр 6 мм, который помещался в один из фокусов эллипсного зеркального кварцевого, с добавлением церия, квантрона. Торцы кристалла  $\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$  были просветлены на длине волны 750 нм, концентрация хрома составляла 0,125 ат.%. Импульсная лампа световой накачки ИНП 5/90 была расположена в противоположном фокусе эллипса. Блок термостатирования позволял стабилизировать температуру циркулирующей воды с точностью  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  в диапазоне 20–80  $^\circ\text{C}$ . Наиболее оптимальная температура александрита, при которой проводились основные эксперименты, составила  $70 \pm 0,5^\circ\text{C}$ .

При работе лазера в режиме свободной генерации ОР состоял из глухого зеркала с радиусом кривизны 3000 мм и полупрозрачного плоского зеркала с коэффициентом отражения  $R_2 = 50\%$ , а также внутррезонаторной диафрагмы диаметром 3,5 мм. Максимальная энергия выходного излучения 160 мДж, временная форма лазерного импульса включала в себя хаотическую структуру амплитудных пиков, энергия накачки лампы могла достигать 260 Дж.

Оптическая схема лазера представлена на рис. 1. Для работы лазера в режиме модуляции добротности и получения гигантского импульса в резонатор устанавливались ячейка Поккельса и пленочный поляризатор. Уменьшение угловой направленности пучка задавалось установкой в резонатор диафрагмы диаметром 3,5 мм. Число Френеля  $N = d^2/4L\lambda = 5,4$ , где  $d$  — диаметр диафрагмы;  $L$  — длина резонатора;  $\lambda$  — длина волны (750 нм). ВСР включал в себя расширяющий телескоп 1 на основе одной или двух прямоугольных призм с четырехкратным увеличением и дифракционную решетку 2 (1200 штр./мм). Обратная связь между ОР и ВСР обеспечивалась отражением пучка от дифракционной решетки 2, установленной в автоколлимационном режиме с отражением в первом порядке. Вывод пучка из лазера обеспечивался отражением излучения от одной грани призмы 1, установленной под углом падения пучка на нее  $85^\circ$ . При этом лазерное излучение имело р-поляризацию в плоскости падения на поляризатор 5 и призму 1. Длина оптического составного резонатора равнялась 75 см.

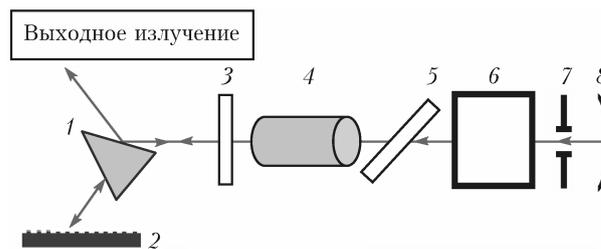


Рис. 1. Оптическая схема лазера: 1 — призмный телескоп; 2 — дифракционная решетка 1200 штр./мм с коэффициентом отражения  $R_3 = 90\%$ ; 3 — полупрозрачное зеркало с  $R_2 = 50\%$ ; 4 — активная среда; 5 — пленочный поляризатор; 6 — электрооптический затвор, 7 — диафрагма  $\varnothing = 3,5$  мм; 8 — зеркало с  $R_1 = 99\%$  и радиусом кривизны  $r_{кр} = 3000$  мм

Измерение временной формы лазерного импульса проводилось фотодетектором DET10A2 с помощью осциллографа TDS-3032. Степень поляризации выходного пучка определялась призмой Глана. Энергия излучения регистрировалась калориметром Gentec-E. Длина волны лазерного излучения и ширина спектральной линии определялись измерителем длин волн SHR (Solar Laser Systems).

### Результаты экспериментов

Для определения условий, обеспечивающих эффективное формирование когерентного излучения в составном резонаторе, были проведены расчеты по оценке оптимальной обратной связи между ОР и ВСР. Экспериментально было получено, что величина обратной связи в ОР, при которой достигается максимальная энергия выходного излучения, а следовательно, и насыщение усиления активной среды, составляет  $k_{ОР} = R_1R_2 = 0,8 \pm 0,1$ , где  $R_1, R_2$  — коэффициенты отражения зеркал ОР (рис. 1).

В нашем случае значение  $k_{ОР} = R_1R_2$  было уменьшено до  $0,5 \pm 0,1$ , а коэффициент обратной связи ВСР был выбран как  $k = R_3(1 - R_1R_2) = 0,3 \pm 0,05$ . Значит полученная величина обратной связи оптического составного резонатора составляла

$$K = R_1R_2 + R_3(1 - R_1R_2)(1 - R_{пр}) = 0,8 \pm 0,15,$$

где  $R_{пр} \approx 33 \pm 1\%$  — коэффициент отражения призмы для угла падения пучка  $82 \pm 2^\circ$ .

Данный эффект обусловлен не только оптимальным распределением связывающих потоков формирующегося допорогового лазерного излучения в ВСР и ОР, но и уменьшением добротности резонатора в ОР относительно оптимальной величины. Эти условия позволяют реализовать режим самоинжекции из ВСР узкополосного излучения в ОР [7]. При этом имеющаяся малая временная задержка формирования узкополосного излучения в ВСР, а также отсутствие селективных элементов, вносящих потери в ОР, позволяют существенно снизить порог генерации и тем самым повысить энергию выходного узкополосного излучения из составного резонатора.

Разработанная нами оптическая схема составного резонатора позволила уменьшить ширину

спектральной линии до 20 пм и обеспечить перестройку длины волны излучения в спектральном диапазоне 740–780 нм. На рис. 2 представлены зависимости энергии выходного лазерного излучения в режиме самоинжекции сигнала от ВСП и длительности выходного лазерного импульса от энергии накачки лампы. Данные результаты получены при  $\lambda = 743$  нм, ширина спектральной линии не превышала 20 пм.

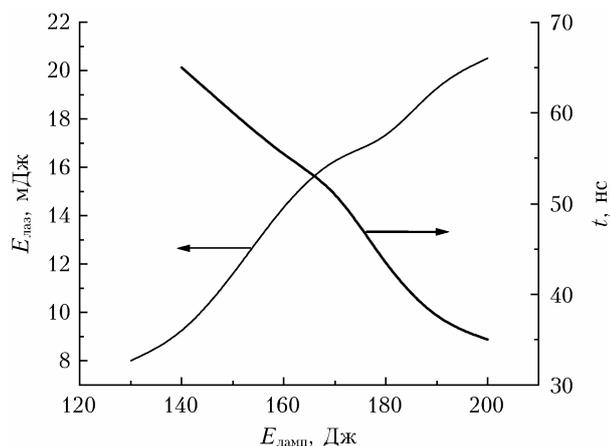


Рис. 2. Зависимости энергии выходного лазерного излучения в режиме самоинжекции сигнала от ВСП и длительности лазерного импульса от энергии накачки лампы

Следует отметить, что экспериментально измеренная ширина спектральной линии генерации была близка к теоретически рассчитанной спектральной полосе пропускания ВСП, учитывающей суммарный вклад угловой дисперсии телескопической призмы и режим работы дифракционной решетки. В нашем случае расчетная спектральная полоса пропускания ВСП задавалась выражением [8]:

$$\Delta\lambda = \frac{0,5\lambda}{d_0 X \left[ \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\lambda} \pm \left( \frac{dn}{d\lambda} \right) \operatorname{tg}A \right]} \approx 22,5 \text{ пм},$$

где  $d_0$  — диаметр диафрагмы;  $X$  — увеличение телескопа;  $\alpha$  — угол падения пучка на решетку;  $n$  — показатель преломления материала призмы;  $A$  — угол при вершине призмы.

Поведение энергии выходного лазерного излучения узкополосной генерации при перестройке длины волны в области 741–760 нм для энергии накачки лампы 160 Дж представлено на рис. 3.

Дальнейшая перестройка длины волны излучения в диапазоне 760–780 нм приводила к плавному снижению энергии до 16 мДж. В то же время резкое снижение энергии генерации с уменьшением длины волны излучения ниже 745 нм обусловлено не только снижением коэффициента усиления активной среды, но и увеличением неселективных потерь на внутррезонаторном поляризаторе, установленном под углом Брюстера.

Влияние температуры кристалла на энергию выходного узкополосного излучения показано на рис. 4. Генерация осуществлялась на  $\lambda = 750$  нм,

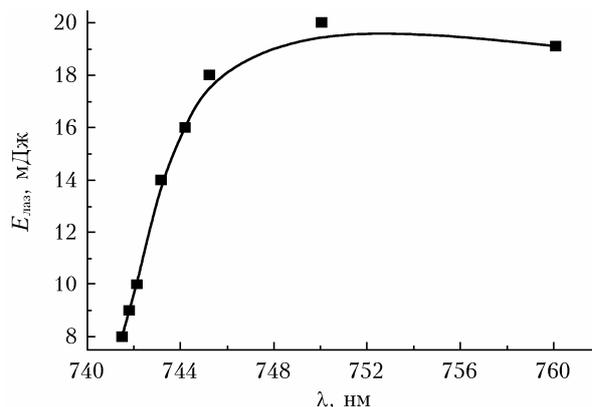


Рис. 3. Зависимость энергии лазерного излучения от плавно перестраиваемой длины волны при неизменной величине накачки 160 Дж

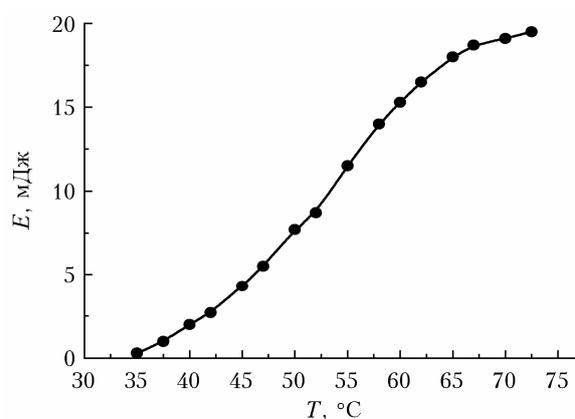


Рис. 4. Зависимость энергии узкополосного лазерного излучения с  $\lambda = 750$  нм от температуры кристалла при энергии накачки лампы 160 Дж

что соответствовало максимуму интенсивности спектрального контура флуоресценции активной среды. Энергия накачки лампы составляла 160 Дж, лазер работал с частотой повторения импульсов до 10 Гц. В ходе изменения температуры кристалла требовалась подстройка резонатора из-за изменения оптических свойств тепловой линзы, возникающей внутри кристалла.

Таким образом, разработанный лазер имеет следующие параметры:

- ширина спектральной линии менее 20 пм;
- диапазон спектральной перестройки 740–780 нм;
- максимальная энергия генерации ( $\lambda = 750$  нм,  $E_{\text{лампы}} = 200$  Дж) 30 мДж;
- длительность импульса на полувысоте интенсивности 35 нс;
- импульсная мощность 850 кВт;
- степень поляризации 99%;
- расходимость (80% энергии) 0,7 мрад;
- частота повторения импульсов 1–10 Гц.

## Заключение

Разработан оригинальный оптический составной резонатор для лазера на александрите, обеспечивающий генерацию узкополосного излучения с шириной

спектральной линии менее 20 пм и возможностью плавной перестройки длины волны в спектральном диапазоне 740–780 нм. Максимальная энергия в импульсе достигала 30 мДж при длительности импульса 35 нс. Определена величина обратной связи внешнего селективного резонатора с основным, позволяющая реализовать условия самоинжекции узкополосного излучения в основной резонатор.

**Финансирование.** Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 20-79-10297) (<https://rscf.ru/project/20-79-10297/>).

### Список литературы

1. Kiefer J., Zhou Bo, Zetterberg J., Li Z., Alden M. Laser-induced fluorescence detection of hot molecular oxygen in flames using an alexandrite laser // *Appl. Spectrosc.* 2014. V. 68, N 11. P. 1266–1273.
2. Wulfmeyer V., Bosenberg J., Lehmann S., Senff C. Injection-seeded alexandrite ring laser: Performance and application in a water-vapor differential absorption lidar // *Opt. Lett.* 1995. V. 20, N 6. P. 638–640.
3. Walling J.C., Peterson O.G., Jentsen H.P., Morris R.C., O'dell E.W. Tunable alexandrite lasers // *IEEE J. Quant. Electron.* 1980. V. 16, N 12. P. 1302–1315.
4. Imai Sh., Yamada T., Fujimori Y., Ishikawa K. Third-harmonic generation of an alexandrite laser in  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> // *Appl. Phys. Lett.* 1989. V. 54, N 13. P. 1206–1208.
5. Анциферов В.В., Иванов Е.В. Мощный одночастотный лазер на александрите с пассивной модуляцией добротности затворами на кристаллах F<sub>3</sub>:LiF, с плавной перестройкой и стабилизацией длины волны генерации. Новосибирск: ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера, 1999. С. 99–40.
6. Тырышкин И.С., Иванов Н.А., Хулугуров В.М. Узкополосный перестраиваемый лазер на александрите с пассивной модуляцией добротности // *Квант. электрон.* 1998. Т. 25, № 6. С. 505–506.
7. Оптический составной резонатор для твердотельных и диодных лазеров: Пат. 217510 U1. Россия. МПК H01S 3/082. Панченко Ю.Н., Пучикин А.В., Андреев М.В.; ФГБУН ИСЭ СО РАН. № 2022133091; Заявл. 15.12.2022; Опубл. 04.04.2023. Бюл. № 10.
8. Анохов С.П., Марусий Т.Я., Соскин М.С. Перестраиваемые лазеры. М.: Радио и связь, 1982. 360 с.

*Yu.N. Panchenko, A.V. Puchikin, M.V. Andreev, I.N. Kononov, E.V. Gorlov. Tunable alexandrite laser for lidar systems.*

The development of laser technologies leads to high requirements for lasers being developed which generate narrow-band radiation with different wavelengths. In view of this, the importance of wavelength-tunable diode and vibronic lasers with broadband amplification circuits increases. The possibility of generating highly coherent radiation in a solid-state alexandrite laser using an original composite resonator which includes an additional external dispersive resonator has been demonstrated. The results of experimental studies of conditions for the generation of narrow-band (less than 20 pm) radiation in such a resonator with the possibility of smooth tuning of the lasing wavelength in the spectral range 740–780 nm are presented. Narrow-band lasing in an alexandrite laser with a radiation energy of 30 mJ and a pulse duration of 35 ns was demonstrated. The created compact narrow-band alexandrite laser can be an effective alternative to parametric oscillators (OPO) and Ti:Sapphire lasers in lidar systems operating in the spectral range 700–850 nm.