

Перестраиваемый лазер на александрите для лидарных систем

Ю.Н. Панченко^{✉1}, А.В. Пучикин¹, М.В. Андреев¹,
И.Н. Коновалов¹, Е.В. Горлов^{2*}

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

²Институт 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 вибранных 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 в твердотельном лазере на александрите 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 $\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Ce}^{3+}$ были просветлены на длине волны 750 нм, концентрация хрома составляла 0,125 ат.%. Импульсная лампа световой накачки ИПП 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 $20\text{--}80^\circ\text{C}$. 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; λ — 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° . При этом лазерное излучение имело р-поляризацию в плоскости падения на поляризатор 5 и призму 1. Длина оптического составного резонатора равнялась 75 см.

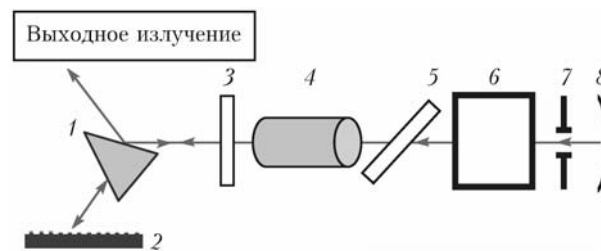


Рис. 1. Оптическая схема лазера: 1 — призменный телескоп; 2 — дифракционная решетка 1200 штр./мм с коэффициентом отражения $R_3 = 90\%$; 3 — полупрозрачное зеркало с $R_2 = 50\%$; 4 — активная среда; 5 — пленочный поляризатор; 6 — электрооптический затвор, 7 — диафрагма $\varnothing = 3,5$ мм; 8 — зеркало 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 нм 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 нм.

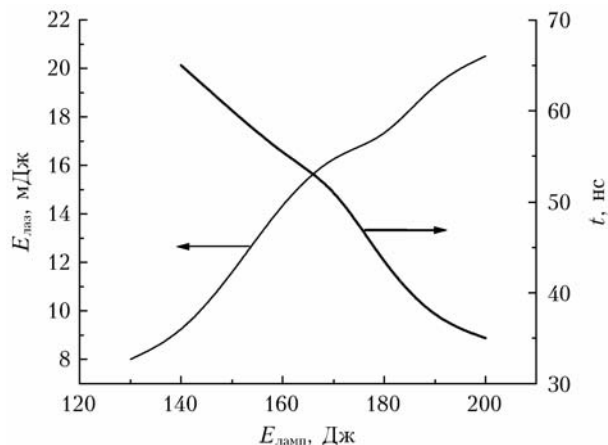


Рис. 2. Зависимости энергии выходного лазерного излучения в режиме самоинжекции сигнала от ВСП и длительности лазерного импульса от энергии накачки лампы

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]:

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

где d_0 — диаметр диафрагмы; X — увеличение телескопа; α — 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 внутрирезонаторном поляризаторе, установленном под углом Брюстера.

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

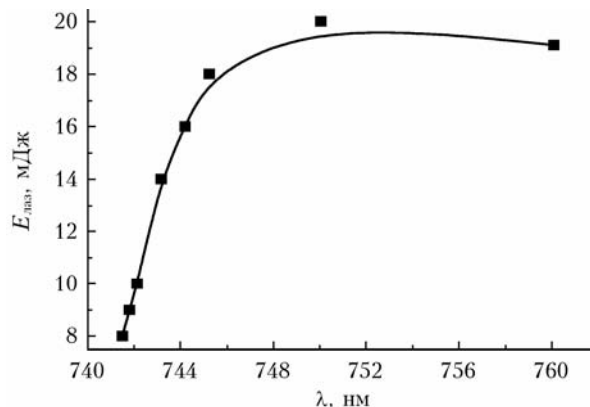


Рис. 3. Зависимость энергии лазерного излучения от плавно перестраиваемой длины волны при неизменной величине накачки 160 Дж

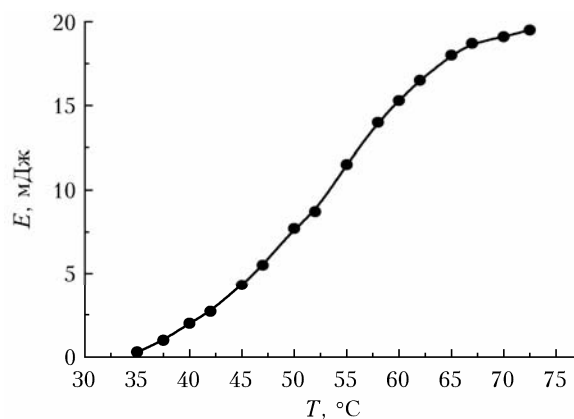


Рис. 4. Зависимость энергии узкополосного лазерного излучения с $\lambda = 750$ нм от температуры кристалла при энергии накачки лампы 160 Дж

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 нм;
- 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 РНФ (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., Jenssen 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 β -BaB₂O₄ // *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 F₃: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 (ОРО) and Ti:Sapphire lasers in lidar systems operating in the spectral range 700–850 nm.