

09

Cr²⁺:ZnSe-лазер как инструмент оптического разделения изотопов редкоземельных металлов

© Н.Г. Захаров, В.И. Лазаренко, Е.В. Салтыков, А.С. Сафонов, М.В. Волков

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия
E-mail: dikaiion@yandex.ru

Поступило в Редакцию 10 ноября 2025 г.

В окончательной редакции 10 ноября 2025 г.

Принято к публикации 5 декабря 2025 г.

Представлена концепция Cr²⁺:ZnSe-лазера, предназначенного для использования в экспериментах по оптическому обогащению изотопа ¹⁷⁶Yb. Приведены экспериментальные характеристики макета лазерного источника, созданного на первом этапе работ. Cr²⁺:ZnSe-лазер с нестационарной активной средой, размещенной в кольцевом резонаторе, одностороннее вращение в котором обеспечивалось путем возврата в него излучения, циркулирующего в направлении, противоположном рабочему, генерировал излучение с мощностью ~ 21.3 W при дифференциальном КПД ~ 28.5 % и оптическом КПД ~ 26.3 %.

Ключевые слова: лазерное разделение изотопов, Cr²⁺:ZnSe-лазер, кольцевой резонатор, нестационарная активная среда.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.07.62520.20565

Лазерное разделение изотопов — эффективный, а порой и единственный способ обогащения редкоземельных элементов, находящих применение в медицинских приложениях [1,2]. В качестве источников излучения в указанных целях используются, как правило, громоздкие и проблемные в эксплуатации, но способные генерировать излучение в широком диапазоне видимого спектра лазеры на красителях. Так, например, задача обогащения изотопа ¹⁷⁶Yb — сырья, необходимого для производства радионуклида ¹⁷⁷Lu, широко применяемого в ядерной медицине, — предполагает трехступенчатую ионизацию паров Yb с помощью импульсно-периодического излучения с длинами волн 555.648, 581.067 и 582.782 nm [2]. Исходя из требований к спектру лазерного излучения можно сделать вывод, что лазеры на красителях являются универсальным и на первый взгляд единственным эффективным инструментом оптического разделения изотопов редкоземельных элементов.

Впрочем, если умножить приведенные длины волн на 4, получив соответственно значения ~ 2222, ~ 2324 и ~ 2331 nm, то становится очевидным, что в целях разделения изотопов могла бы быть в принципе использована четвертая гармоника излучения Cr²⁺:ZnSe-лазера, генерирующего излучение в широкой (от 2 до 3 μm) области инфракрасного спектра. Для оценки возможности применения Cr²⁺:ZnSe-лазера в качестве инструмента разделения изотопов приведем прочие требования, которым должно удовлетворять излучение лазерного источника: мощность излучения канала первой ступени ионизации ~ 1 W, второй ступени ~ 2 W, третьей ~ 8 W, частота повторения импульсов ~ 10 kHz, длительность импульсов ~ 20 ns, ширина линии излучения не более ~ 250 MHz с точностью

позиционирования ~ 50 MHz [1]. Исходя из того, что эффективность каждого каскада преобразования во вторую гармонику составляет ~ 50 %, требования к мощности излучения необходимо увеличить четырехкратно.

В настоящее время в научной литературе описаны различные подходы к созданию Cr²⁺:ZnSe-лазеров, каждый из которых позволяет создавать лазерный источник, обладающий лишь частью параметров, удовлетворяющих представленным выше требованиям. Так, в работах [3,4] продемонстрированы мощные непрерывные лазеры на основе подвижной активной среды, использующие линейные резонаторы стоячей волны, которые принципиально не способны обеспечить необходимую ширину и точность позиционирования линии генерации вследствие хорошо известного эффекта „выжигания дыр“ [5]. В работах [6,7] были описаны непрерывные Cr²⁺:ZnSe-лазеры с односторонними кольцевыми резонаторами, генерирующие излучение мощностью 160 и 754 mW при спектральной ширине линии генерации ~ 100 и ~ 29 MHz. В работе [8] был продемонстрирован размещенный в линейном резонаторе импульсно-периодический Cr²⁺:ZnSe-лазер с накачкой излучением Ho:YAG-лазера, генерирующий излучение с мощностью 5.5 W и частотой повторения импульсов 2 kHz.

Очевидно, что Cr²⁺:ZnSe-лазер, который мог бы рассматриваться в качестве инструмента оптического разделения изотопов, должен включать в себя основные элементы всех рассмотренных выше подходов. Для удовлетворения требований к спектру излучения лазер должен быть помещен в односторонний кольцевой резонатор бегущей волны. Для достижения необходимого уровня мощности следует использовать технологию нестационарной активной среды. Импульсно-периодический

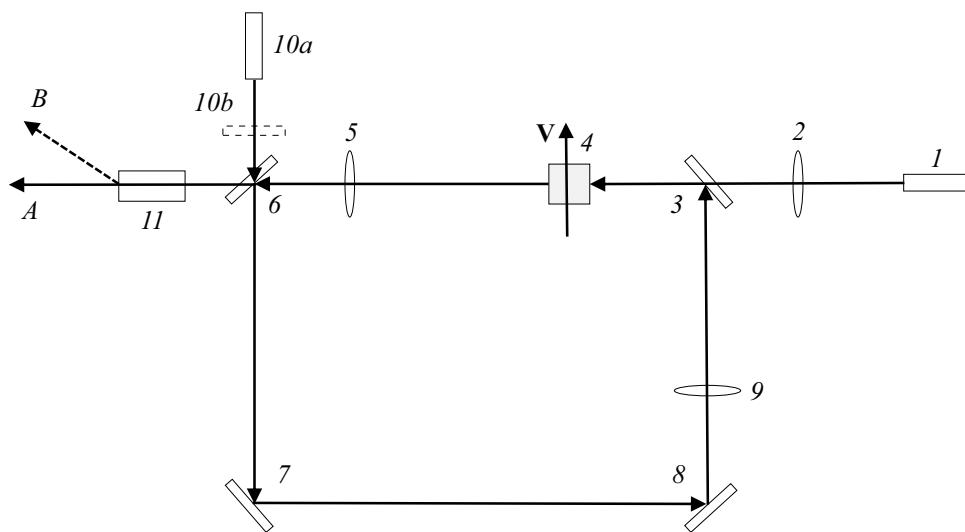


Рис. 1. Оптическая схема $\text{Cr}^{2+}\text{:ZnSe}$ -лазера.

режим может быть обеспечен за счет использования в качестве источника накачки Ho:YAG -лазера.

Оптическая схема перспективного источника представлена на рис. 1. Источником накачки $\text{Cr}^{2+}\text{:ZnSe}$ -лазера, размещенного в одностороннем кольцевом резонаторе, служит импульсно-периодический гольмийевый лазер 1. Излучение накачки фокусируется с помощью линзы 2 в нестационарный активный элемент 4, движущийся в направлении вектора \mathbf{V} . Входная и выходная плоские грани активного элемента имеют взаимную клиновидность с углом γ . Резонатор образован четырьмя плоскими зеркалами: глухими 7 и 8, обладающими высоким коэффициентом отражения в области генерации, выходным 6 и дихроичным зеркалом 3, обладающим высоким коэффициентом отражения для излучения генерации и прозрачными для излучения накачки. Для согласования размеров пучка накачки и моды резонатора в резонатор вводятся две линзы 5 и 9.

Для обеспечения односторонней циркуляции излучения в резонаторе, а также в целях придания излучению необходимых спектральных характеристик в резонатор через зеркало 6 вводится сидирующее излучение непрерывного одночастотного $\text{Cr}^{2+}\text{:ZnSe}$ -лазера 10a, построенного по одной из известных схем [6,7]. На выходе лазерного источника устанавливается акустооптический фильтр 11, служащий для разделения излучения генерации и сидирующего излучения.

Пусть активный элемент движется со скоростью V , тогда набег фазы $\Delta\varphi$ излучения при обходе резонатора будет зависеть от времени t как

$$\Delta\varphi(t) = \frac{2\pi n}{\lambda} \operatorname{tg}(\gamma) V t, \quad (1)$$

где $\lambda \sim 2.3 \mu\text{m}$ — длина волны излучения, а $n \sim 2.44$ — показатель преломления активной среды. Тогда с перио-

дом ΔT , равным

$$\Delta T = \frac{\lambda}{\operatorname{tg}(\gamma) V n}, \quad (2)$$

излучение с длиной волны λ будет обходить резонатор с набегом фазы, кратным 2π , т. е. будет модой резонатора. Для параметров описанного далее макета $V \sim 12.5 \text{ m/s}$ и $\gamma \sim 0.2^\circ$ период ΔT составит $\sim 21 \mu\text{s}$. Таким образом, при частоте импульсов накачки $\sim 10 \text{ kHz}$ на временному интервале между двумя импульсами генерации будет несколько моментов времени, когда сидирующее излучение будет представлять собой продольную моду резонатора. В эти моменты будет наблюдаться значительное падение мощности сидирующего излучения, отраженного от зеркала 6.

Зависимость коэффициента отражения сидирующего излучения R_s от времени можно найти с помощью выражения [9]:

$$R_s(t) = R + (1 - R) \frac{(1 - R)R_R + 2RR_R - 2\sqrt{RR_R} \cos(\Delta\varphi(t))}{1 + RR_R - 2\sqrt{RR_R} \cos(\Delta\varphi(t))}, \quad (3)$$

где R — коэффициент отражения выходного зеркала 6, а R_R — коэффициент отражения, учитывающий потери при обходе резонатора. Зависимость $R_s(t)$ для параметров описанного далее макета $R_6 \sim 50\%$, $R_R \sim 70\%$ представлена на рис. 2.

Как видно из рисунка, спад отраженной мощности сидирующего излучения до минимума в момент времени $t = 0$ занимает несколько микросекунд. С учетом того, что пучок излучения $\text{Cr}^{2+}\text{:ZnSe}$ -лазера имеет диаметр $\sim 300 \mu\text{m}$ и расположен на расстоянии $\sim 1 \text{ mm}$ от пьезоэлемента акустооптического фильтра 11, при скорости звука в парателлуриде $\sim 850 \text{ m/s}$ время переключения фильтра составит $\sim 1 \mu\text{s}$. Таким образом, контролируя

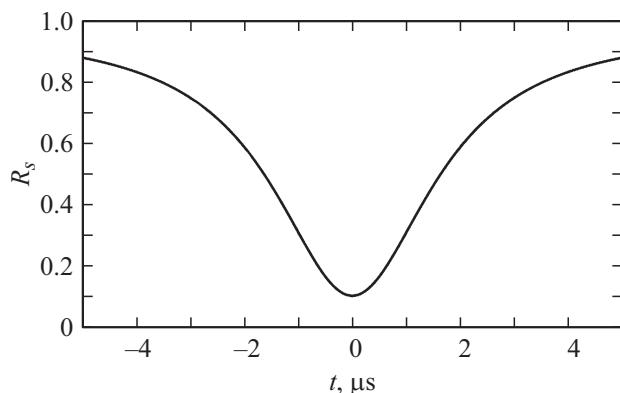


Рис. 2. Расчетная зависимость коэффициента отражения выходного зеркала для сидирующего излучения.

мощность сидирующего излучения, отраженного от зеркала 6, быстродействующим диодом, расположенным в положении B , с целью синхронизации времени подачи импульса накачки и установления необходимой длины резонатора можно успеть переключить фильтр, направив тем самым сгенерированное излучение в положение A .

Таким образом, представленная выше оптическая схема позволяет достигать необходимого уровня мощности излучения за счет использования нестационарной активной среды и генерировать излучение с эквивалентными сидирующему сигналу спектральными характеристиками за счет синхронизации времени подачи импульса накачки с установлением нужной длины одностороннего кольцевого резонатора по уровню отраженного от выходного зеркала сидирующего излучения.

На первом этапе работ был создан макет Cr²⁺:ZnSe-лазера с оптической схемой, соответствующей в большей части рис. 1. В качестве источника накачки использовался волоконный тулиевый лазер с длиной волны генерации 1.908 μm. Фокусное расстояние линзы 2 составляло ~ 100 mm. Диаметр пучка излучения накачки в активном элементе составлял ~ 0.3 mm. Активный элемент представлял собой поликристалл Cr²⁺:ZnSe толщиной ~ 7 mm, изготовленный в ИХВВ РАН (Нижний Новгород) методом CVD с послеростовым легированием в процессе диффузии при высокотемпературном изостатическом прессовании. Легирование ионами Cr²⁺ производилось с двух сторон диска, глубина легирования одного слоя составляла ~ 0.5 mm. Поверхности активного элемента полировались, а затем просветлялись для длины волны накачки и генерации от 1.9 до 2.7 μm. Согласно экспериментальным данным, активный элемент поглощал ~ 95% ослабленного излучения накачки. Скорость движения активной среды составляла ~ 12.5 m/s.

Выходное зеркало 6 обладало коэффициентом отражения в области генерации ~ 50 %. Фокусное расстояние линз 5 и 9 составляло ~ 50 mm. Расстояние между элементами резонатора составляло: от 3 до 4 ~ 20 mm,

от 4 до 5 ~ 60 mm, от 6 до 7 ~ 70 mm, от 7 до 8 ~ 100 mm, от 8 до 9 ~ 30 mm, от 9 до 3 ~ 40 mm. Физическая длина резонатора составляла ~ 340 mm. Расчеты по матричному методу для описанного резонатора показывают, что диаметр основной моды в активном элементе ~ 250 μm. Тепловая линза, которая неизбежно появляется в активном элементе в процессе генерации, на размер основной моды влияет незначительно.

На данном этапе работ источник сидирующего излучения не использовался. Для обеспечения односторонней циркуляции излучения в резонаторе на одном из его выходов устанавливалось плоское зеркало 10b, возвращающее в резонатор излучение, движущееся в направлении, противоположном рабочему. Подобный способ самосидиривания был использован в работе [7].

На рис. 3 представлены экспериментальные и расчетные зависимости мощности излучения генерации Cr²⁺:ZnSe-лазера от мощности излучения накачки при двунаправленном (без установки зеркала 10) и одностороннем обходе резонатора. Расчетная зависимость мощности генерации Cr²⁺:ZnSe-лазера от мощности накачки была получена при величине суммарных внутрирезонаторных потерь 31.6 %. Высокое значение внутрирезонаторных потерь может быть связано как с качеством просветляющих покрытий на активном элементе, так и с нерезонансным поглощением.

Из рисунка видно, что при двунаправленном обходе резонатора максимальная суммарная мощность генерации составляла ~ 20.2 W при оптическом КПД ~ 24.9 % и дифференциальном КПД ~ 28.0 %. При одностороннем обходе резонатора максимальная мощность генерации составляла ~ 21.3 W при оптическом КПД ~ 26.3 % и дифференциальном КПД ~ 28.5 %. Следует отметить, что при двунаправленном обходе резонатора мощность генерации примерно поровну делилась между двумя направлениями. Аналогичная ситуация наблюдалась и в расчете.

На рис. 4 представлен спектр генерации при одностороннем и суммарный спектр генерации при дву-

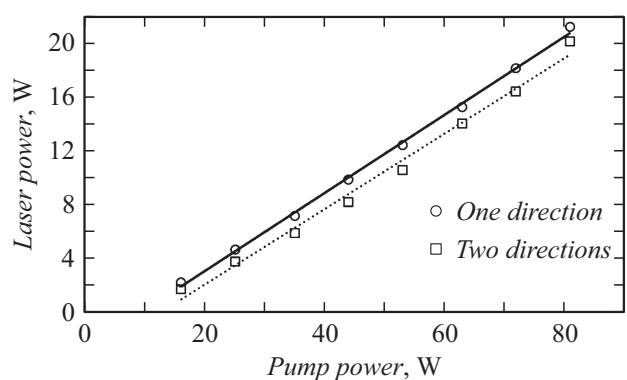


Рис. 3. Расчетная (линия) и экспериментальная (символы) зависимости мощности генерации Cr²⁺:ZnSe-лазера от мощности накачки при двунаправленном и одностороннем обходе резонатора.

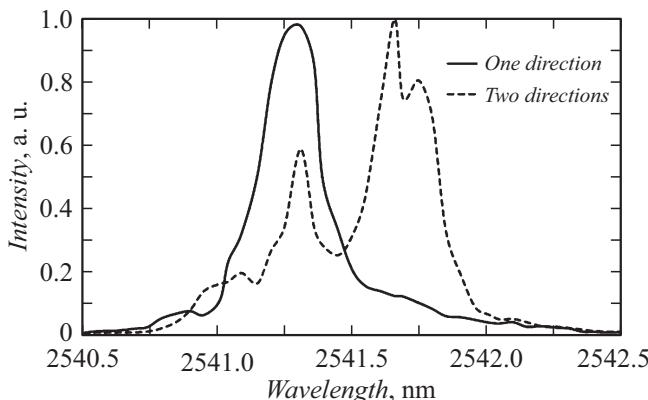


Рис. 4. Спектры генерации при однонаправленном и двунаправленном обходе резонатора.

направленном обходе резонатора. Как видно из рисунка, при однонаправленном обходе резонатора спектр генерации представляет собой один узкий пик шириной $\sim 0.3 \text{ nm}$. При двунаправленном обходе спектр генерации представляет собой несколько пиков общей шириной $\sim 0.8 \text{ nm}$.

Таким образом, на первом этапе работ была экспериментально подтверждена одна из основных составляющих концепции применения $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера для оптического разделения изотопов редкоземельных металлов — возможность создания лазерного источника на основе нестационарной активной среды $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, размещенной в кольцевом резонаторе, однонаправленная циркуляция излучения в котором обеспечивается за счет сидирования излучения через выходное зеркало резонатора.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке национального проекта „Наука и университеты“ (проект FSWR-2024-0004) за счет субсидии федерального бюджета на финансовое обеспечение государственного задания на выполнение научно-исследовательских работ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] О.И. Андреев, В.И. Держиев, В.М. Дякин, А.Г. Егоров, Л.А. Михальцов, В.А. Тарасов, А.И. Толкачев, Ю.Г. Топоров, С.А. Чаушанский, С.И. Яковленко, Квантовая электроника, **36** (1), 84 (2006). [O.I. Andreev, V.I. Derzhiev, V.M. Dyakin, A.G. Egorov, L.A. Mikhaltsov, V.A. Tarasov, A.I. Tolkachev, Yu.G. Toporov, S.A. Chaushanskii, S.I. Yakovlenko, Quantum Electron., **36** (1), 84 (2006)]. DOI: 10.1070/QE2006v036n01ABEH013105].
- [2] H. Park, D.-H. Kwon, Y. Cha, S. Nam, T.-S. Kim, J. Han, Y. Rhee, D.-Y. Jeong, C.-J. Kim, J. Korean Phys. Soc., **49** (1), 282 (2006).
- [3] I. Moskalev, S. Mirov, M. Mirov, S. Vasilyev, V. Smolski, A. Zakrevskiy, V. Gapontsev, Opt. Express, **24** (18), 21090 (2016). DOI: 10.1364/oe.24.021090
- [4] Н.Г. Захаров, Р.А. Зорин, В.И. Лазаренко, Е.В. Салтыков, А.А. Лобанова, А.В. Маругин, В.А. Гарюткин, Г.М. Мищенко, М.В. Волков, Ф.А. Стариков, Письма в ЖТФ, **48** (6), 16 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.06.52205.19099 [N.G. Zakharov, R.A. Zorin, V.I. Lazarenko, E.V. Saltykov, A.A. Lobanova, A.V. Marugin, V.A. Garyutkin, G.M. Mishchenko, M.V. Volkov, F.A. Starikov, Tech. Phys. Lett., **48**, 150 (2022). DOI: 10.1134/S1063785022040150].
- [5] R. Danilin, V. Fedorov, D. Martyshkin, O. Gafarov, S. Mirov, Opt. Express, **31** (8), 12686 (2023). DOI: 10.1364/OE.486474
- [6] N. Coluccelli, M. Cassinerio, P. Laporta, G. Galzerano, Opt. Lett., **37** (24), 5088 (2012). DOI: 10.1364/OL.37.005088
- [7] Y. Liu, Q. Wang, F. Yang, H. Zhang, W. Li, J. Zhang, C. Gao, Opt. Express, **32** (26), 45946 (2024). DOI: 10.1364/OE.543235
- [8] Д.-Х. Юань, Ю. Чен, Х.-Ю. Янг, Б.-К. Яо, К.-М. Дуан, Т.-Ю. Даи, Ю.-Л. Джу, Квантовая электроника, **46** (9), 772 (2016). [J.-H. Yuan, Y. Chen, H.-Y. Yang, B.-Q. Yao, X.-M. Duan, T.-Y. Dai, Y.-L. Ju, Quantum Electron., **46** (9), 772 (2016). DOI: 10.1070/QEL16157].
- [9] E. Jurdik, J. Hohlfeld, A.F. van Etteger, A.J. Toonen, W.L. Meerts, H. van Kempen, Th. Rasing, J. Opt. Soc. Am. B, **19** (7), 1660 (2002). DOI: 10.1364/JOSAB.19.001660