

## 09 Импульсный $2.77 \mu\text{m}$ $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазер с выходной энергией 1.2 J

© В.И. Козловский, Ю.В. Коростелин, Я.К. Скасырский, М.П. Фролов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия  
E-mail: kozlovskiyvi@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 24 июня 2024 г.

В окончательной редакции 30 августа 2024 г.

Принято к публикации 8 сентября 2024 г.

Из-за высокого значения термооптического коэффициента кристалла CdSe энергетические характеристики  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера ограничиваются развитием тепловой линзы. Для снижения влияния тепловой линзы выращен кристалл большого объема, позволивший увеличить диаметр до  $\sim 5 \text{ mm}$  и длину области возбуждения до  $\sim 9 \text{ mm}$ . В результате реализован режим линейного роста выходной энергии  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера до рекордного значения 1.2 J при дифференциальном КПД лазера по поглощенной энергии накачки 51%.

**Ключевые слова:**  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазер, тепловая линза, Er:YAG-лазер, Cr:Tm:Ho:YAG-лазер.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.02.59552.20032

Соединения II–VI, легированные двухвалентными ионами переходных металлов, впервые предложенные в качестве лазерных сред для среднего инфракрасного диапазона [1,2], в дальнейшем привлекли серьезное внимание исследователей [3]. Обладая широкой полосой усиления, эти материалы представляют большой интерес для разработки как перестраиваемых лазеров, так и фемтосекундных лазеров, которые находят применение в медицине, мониторинге окружающей среды, спектроскопии и метрологии.

В данном классе лазеров наиболее исследованы  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ - и  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазеры, охватывающие соответственно спектральные диапазоны 1.880–3.349 [4,5] и 3.76–5.29  $\mu\text{m}$  [6]. Лазер на основе  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ , впервые продемонстрированный в [7], обеспечивает доступ к спектральной области 2.22–3.61  $\mu\text{m}$  [8,9], длинноволновая часть которой дополняет диапазоны излучения  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ - и  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазеров.

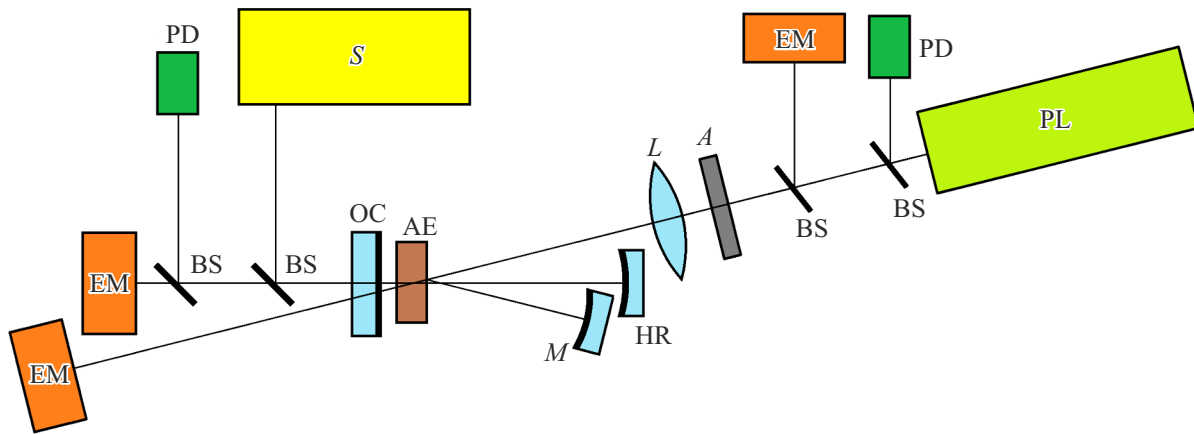
Подавляющее большинство исследований  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера направлено на увеличение его средней мощности. В непрерывном лазере с подвижной активной средой была достигнута выходная мощность 22.5 W [10], а в импульсно-периодическом режиме при частоте следования импульсов 8 kHz продемонстрирована средняя мощность 6 W при КПД 67% [11]. Максимальное значение энергии в одном импульсе до настоящего времени составляло 17 mJ [8]. Между тем для ряда практических приложений, например, в обработке биоматериалов [12] представляют интерес высокоэнергетические лазерные импульсы, спектр которых совпадает с полосой поглощения воды. Цель настоящей работы — масштабирование выходной энергии отдельного импульса  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Активным элементом (АЭ) лазера служил непрозрачный плоскопараллельный образец монокристалла  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$  толщиной 8.8 mm и диаметром 27 mm с оптической осью вдоль оси резонатора, выращенный

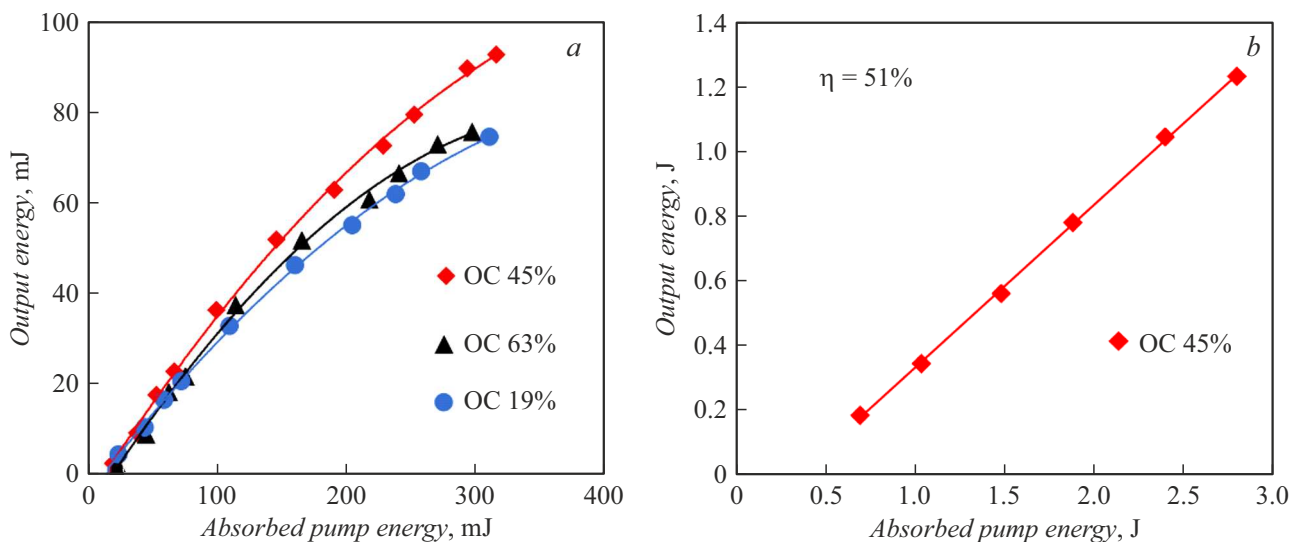
по технологии физического транспорта в гелии [9]. Концентрация ионов  $\text{Cr}^{2+}$  составляла  $1.8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Высоковоспроизводимый рост кристалла осуществлялся при температуре 1150°C в течение 200 h. Резонатор  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера длиной 110 mm был образован глухим сферическим зеркалом радиусом 300 mm и плоским выходным зеркалом. АЭ располагался у выходного зеркала и специально не охлаждался. Использовались выходные зеркала с пропусканием 19, 45 и 63% вблизи длины волны 2.75  $\mu\text{m}$ .

В предварительных экспериментах источником накачки служил импульсный 1.78  $\mu\text{m}$  Er:YAG-лазер с максимальной энергией 350 mJ и длительностью импульса 250  $\mu\text{s}$ . При фокусировке линзой  $L$  с фокусным расстоянием 100 mm в пятне накачки диаметром 1.4 mm на входной поверхности АЭ содержалось 80% энергии накачки. Накачка осуществлялась под углом 0.06 rad по отношению к оси резонатора. Для более эффективного использования энергии накачки пучок накачки, отраженный от грани АЭ (френелевское отражение 18%), возвращался в активную область сферическим зеркалом  $M$  радиусом 100 mm. Энергия накачки регулировалась с помощью аттенюатора (набора калиброванных светофильтров). Использовались три измерителя энергии (Ophir Optronics) для регистрации энергии накачки, поступающей в АЭ и прошедшей через него, и выходной энергии  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера, что позволяло определять КПД лазера по отношению к поглощенной энергии накачки. Временной ход импульсов накачки и генерации регистрировался фотодиодами PD36 (ООО „АИБИ“), спектр генерации измерялся самодельным дифракционным спектрографом.

Зависимости выходной энергии  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера от поглощенной энергии накачки, измеренные при диаметре пятна накачки 1.4 mm для трех выходных зеркал, показаны на рис. 2, а. Центр спектра генерации во всех трех случаях располагался вблизи длины волны 2.77  $\mu\text{m}$ ,



**Рис. 1.** Схема установки. PL — лазер накачки, BS — расщепитель луча, PD — фотодиод, EM — измеритель энергии, L — фокусирующая линза, A — аттенуатор пучка, HR и OC — глухое и выходное зеркала резонатора  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера, AE — кристалл  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ , M — сферическое Al-зеркало, S — дифракционный спектрограф.



**Рис. 2.** Зависимости выходной энергии  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера от поглощенной энергии накачки, полученные с различными выходными зеркалами при диаметре пятна накачки  $1.4$  (a) и  $4.7\ \text{mm}$  (b).

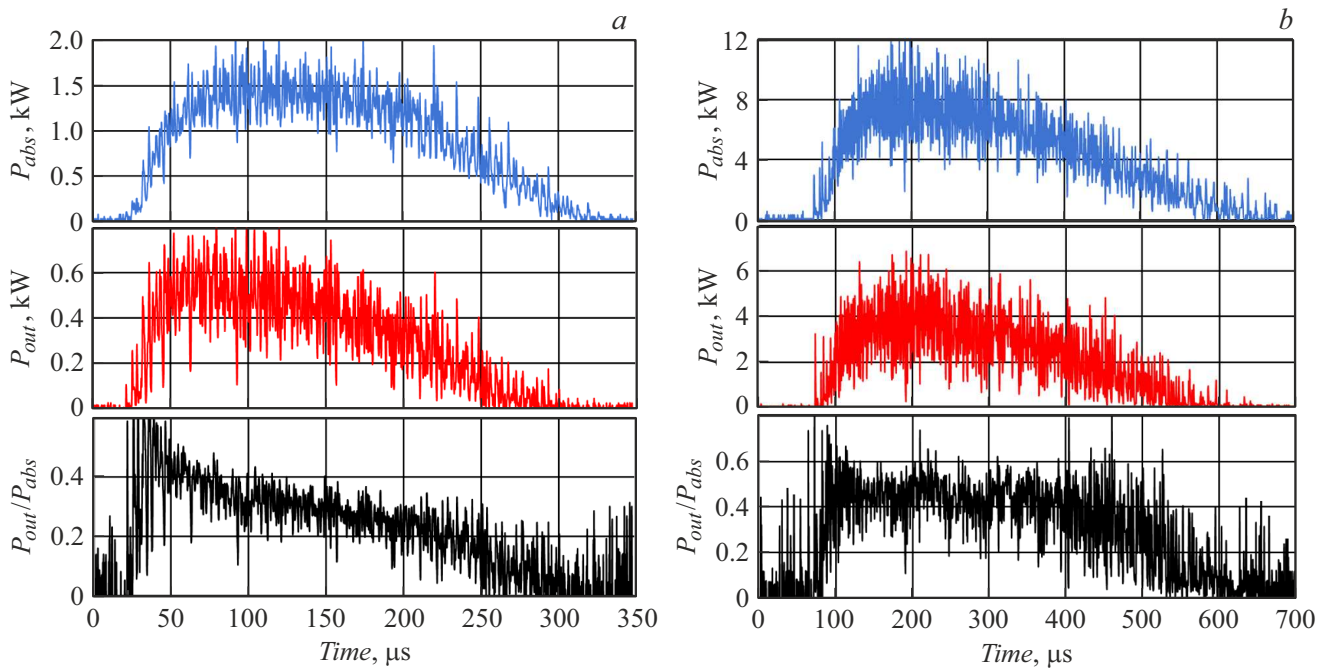
а его ширина на полувысоте при энергии накачки  $300\ \text{mJ}$  составляла  $\sim 0.2\ \mu\text{m}$ .

Наилучший результат был получен при использовании выходного зеркала с пропусканием  $45\%$ . В этом случае дифференциальный КПД лазера, измеренный по начальному участку экспериментальной кривой (поглощенная энергия накачки менее  $100\ \text{mJ}$ ), составил  $43\%$ . Однако, как видно из рис. 2, a, при более высоких энергиях во всех случаях наблюдается насыщение выходной энергии, что может быть связано с нагревом активной области, в результате чего уменьшается время жизни верхнего лазерного уровня, и в АЭ возникает положительная динамическая тепловая линза. Первый фактор не может сказываться на эффективности лазера, поскольку оценочный нагрев АЭ на  $3\ \text{K}$  приведет лишь к незначительному снижению времени жизни с  $3.8\ \mu\text{s}$  не более чем на  $0.25\ \mu\text{s}$  [13].

На наш взгляд, основную роль играет тепловая линза, возникающая в АЭ. Исходя из проведенного в [14] анализа нетрудно показать, что при параболическом распределении энергии накачки по сечению пучка фокусное расстояние можно оценить по формуле

$$F = \pi r_0^4 C / (4Q \cdot dn/dT), \quad (1)$$

где  $r_0 = 0.95\ \text{mm}$  — радиус пучка накачки, содержащего  $100\%$  энергии, теплоемкость  $C = 2.85\ \text{J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$  [15],  $dn/dT = 98 \cdot 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$  [16] (влияние термоупругих деформаций не учитывалось из-за малости коэффициента температурного расширения),  $Q$  — энергия накачки, расходуемая на нагрев АЭ. При максимальной поглощенной энергии накачки  $315\ \text{mJ}$  выходная энергия лазера составила  $93\ \text{mJ}$ , поэтому в тепло переходит энергия  $Q = 222\ \text{mJ}$ . Для такого случая расчетное



**Рис. 3.** Форма импульса накачки (верхняя осциллограмма), генерации (средняя) и отношение мощности генерации к мощности накачки (нижняя). *a* — диаметр пучка накачки 1.4 mm, поглощенная энергия накачки 300 mJ; *b* — диаметр пучка накачки 4.7 mm, поглощенная энергия накачки 2.6 J.

фокусное расстояние линзы составляет  $F \approx 84$  mm. Поскольку АЭ расположен вблизи плоского выходного зеркала, это зеркало совместно с тепловой линзой работает как сферическое зеркало с радиусом кривизны  $F$ , что выводит резонатор из области устойчивости, определяемой условием  $0 < (1 - S/R_1)(1 - S/R_2) < 1$  [17], где  $S = 110$  mm — длина резонатора,  $R_1 \approx F \approx 84$  mm — эффективный радиус выходного зеркала,  $R_2 = 300$  mm — радиус кривизны глухого зеркала. В нашем случае несоосной накачки влияние тепловой линзы на пучок снижается и приводит лишь к насыщению энергии.

На рис. 3 показаны осциллограммы импульса накачки  $P_{abs}$ , импульса генерации  $P_{out}$ , а также зависимость от времени отношения выходной мощности лазера к поглощенной мощности накачки. Из представленных на рис. 3, *a* осциллограмм видно, что при диаметре пучка накачки 1.4 mm импульс генерации спадает быстрее, чем импульс накачки, что подтверждает предположение о развитии в АЭ динамической тепловой линзы.

Очевидным решением является увеличение поперечного размера активной области, что позволяет уменьшить отрицательную роль тепловой линзы за счет увеличения ее фокусного расстояния. Однако увеличение пятна накачки приводит к возрастанию порога генерации, что требует повышения энергии импульса накачки. Поэтому в дальнейших экспериментах источником накачки служил однократноимпульсный  $2.11 \mu\text{m}$  Cr:Tm:Ho:YAG-лазер с максимальной энергией 3.3 J и длительностью импульса 500  $\mu\text{s}$ . При фокусировке линзой с фокусным

расстоянием 320 mm пятно накачки имело диаметр 4.7 mm (80% энергии) на входной поверхности АЭ. В этих условиях при максимальной накачке расходуемая на нагрев энергия равна  $Q = 1.6$  J (разность между поглощенной энергией и выходной энергией) и  $r_0 = 3.2$  mm, что при расчете по формуле (1) дает фокусное расстояние  $F \approx 1500$  mm, т.е. резонатор лазера остается устойчивым даже при максимальной накачке.

Зависимость выходной энергии от поглощенной энергии накачки, полученная в этом случае с оптимальным выходным зеркалом с пропусканием 45%, показана на рис. 2, *b*. Во всем диапазоне энергий накачки наблюдается линейный рост выходной энергии, и максимальная выходная энергия превышает 1.2 J при дифференциальном КПД по поглощенной энергии накачки 51%. Из представленных на рис. 3, *b* осциллограмм видно, что в течение практически всего импульса накачки отношение мощности генерации к мощности накачки остается постоянным. Лазер работал в многомодовом режиме, угол расходимости пучка  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера составлял примерно 15 mrad при энергии 1 J.

Таким образом, в работе получена выходная энергия  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера 1.2 J, что превышает ранее опубликованные результаты почти на два порядка. Дифференциальный КПД лазера составил 51%. Преимуществом данного лазера перед хорошо известными лазерами Er:YAG ( $2.94 \mu\text{m}$ ) и Cr:Er:YSGG ( $2.79 \mu\text{m}$ ) является возможность широкой перестройки длины волны в диапазоне 2.22–3.61  $\mu\text{m}$ .

**Финансирование работы**

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема FFMR-2024-0017).

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

**Список литературы**

- [1] L.D. DeLoach, R.H. Page, G.D. Wilke, S.A. Payne, W.P. Krupke, IEEE J. Quantum Electron., **32** (6), 885 (1996). DOI: 10.1109/3.502365
- [2] R.H. Page, K.I. Schaffers, L.D. DeLoach, G.D. Wilke, F.D. Patel, J.B. Tassano, Jr, S.A. Payne, W.F. Krupke, K.T. Chen, A. Burger, IEEE J. Quantum Electron., **33** (4), 609 (1997). DOI: 10.1109/3.563390
- [3] S. Mirov, I. Moskalev, S. Vasilyev, V. Smolski, V. Fedorov, D. Martyshkin, J. Peppers, M. Mirov, A. Dergachev, V. Gapontsev, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **24** (5), 1601829 (2018). DOI: 10.1109/JSTQE.2018.2808284
- [4] U. Demirbas, A. Sennaroglu, Opt. Lett., **31** (15), 2293 (2006). DOI: 10.1364/OL.31.002293
- [5] E. Sorokin, I.T. Sorokina, M.S. Mirov, V.V. Fedorov, I.S. Moskalev, S.B. Mirov, in *Advanced solid-state photonics 2010* (San Diego, USA, 2010), paper AMC2. DOI: 10.1364/ASSP.2010.AMC2
- [6] P. Fjodorow, M.P. Frolov, Yu.V. Korostelin, V.I. Kozlovsky, C. Schulz, S.O. Leonov, Ya.K. Skasyrsky, Opt. Express, **29** (8), 12033 (2021). DOI: 10.1364/OE.422926
- [7] J. McKay, K.L. Schepler, G.C. Catella, Opt. Lett., **24** (22), 1575 (1999). DOI: 10.1364/OL.24.001575
- [8] T.T. Fernandez, M.K. Tarabrin, Y. Wang, V.A. Lazarev, S.O. Leonov, V.E. Karasik, Yu.V. Korostelin, M.P. Frolov, Yu.P. Podmarkov, Ya.K. Skasyrsky, V.I. Kozlovsky, C. Svelto, P. Maddaloni, N. Coluccelli, P. Laporta, G. Galzerano, Opt. Mater. Express, **7** (11), 3815 (2017). DOI: 10.1364/OME.7.003815
- [9] В.А. Акимов, В.И. Козловский, Ю.В. Коростелин, А.И. Ландман, Ю.П. Подмарьков, Я.К. Скасырский, М.П. Фролов, Квантовая электроника, **38** (3), 205 (2008). [V.A. Akimov, V.I. Kozlovskii, Yu.V. Korostelin, A.I. Landman, Yu.P. Podmar'kov, Ya.K. Skasyrskii, M.P. Frolov, Quantum Electron., **38** (3), 205 (2008). DOI: 10.1070/QE2008v038n03ABEH013707].
- [10] 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].
- [11] O.L. Antipov, I.D. Eranov, M.P. Frolov, Yu.V. Korostelin, V.I. Kozlovsky, Ya.K. Skasyrsky, Opt. Lett., **44** (5), 1285 (2019). DOI: 10.1364/OL.44.001285
- [12] M. Yumoto, N. Saito, T. Lin, R. Kawamura, A. Aoki, Y. Izumi, S. Wada, Biomed. Opt. Express, **9** (11), 5645 (2018). DOI: 10.1364/BOE.9.005645
- [13] M.K. Tarabrin, D.V. Ustinov, S.M. Tomilov, V.A. Lazarev, V.E. Karasik, V.I. Kozlovsky, Yu.V. Korostelin, Ya.K. Skasyrsky, M.P. Frolov, Opt. Express, **27** (9), 12090 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.012090
- [14] Л.В. Тарасов, *Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения* (Радио и связь, М., 1981), с. 231–238.
- [15] S. Mirov, V. Fedorov, I. Moskalev, M. Mirov, D. Martyshkin, J. Lumin., **133**, 268 (2013). DOI: 10.1016/j.jlumin.2011.09.040
- [16] I.T. Sorokina, Opt. Mater., **26**, 395 (2004). DOI: 10/1016/j.optmat.2003.12.025
- [17] *Справочник по лазерам*, под ред. А.М. Прохорова (Сов. радио, М., 1978), т. II, с. 16.