

07.3;09.2

**Cr<sup>2+</sup> : CdSe-лазер с мощностью непрерывной генерации более 20 W**

© Н.Г. Захаров<sup>1,2</sup>, Р.А. Зорин<sup>1</sup>, В.И. Лазаренко<sup>1,2</sup>, Е.В. Салтыков<sup>1,2</sup>, А.А. Лобанова<sup>1-3</sup>, А.В. Маругин<sup>2</sup>,  
В.А. Гарюткин<sup>1</sup>, Г.М. Мищенко<sup>1</sup>, М.В. Волков<sup>1</sup>, Ф.А. Стариков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская область, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup> Филиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в городе Сарове, Сатис, Нижегородская область, Россия

E-mail: dikaion@yandex.ru

Поступило в Редакцию 7 декабря 2021 г.

В окончательной редакции 21 декабря 2021 г.

Принято к публикации 21 декабря 2021 г.

Сильные тепловые линзы ограничивают достижимую выходную мощность лазеров на основе активной среды Cr<sup>2+</sup>:CdSe, обладающей неблагоприятными теплофизическими свойствами (низкой теплопроводностью и высоким значением термооптического коэффициента), уровнем ~ 2 W. Переход от классической схемы построения лазерного источника к схеме с подвижной активной средой позволил достичь в кристалле Cr<sup>2+</sup>:CdSe величины мощности непрерывной генерации более 20 W.

**Ключевые слова:** кристалл Cr<sup>2+</sup>:CdSe, лазерная генерация, тепловая линза, подвижная активная среда.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.06.52205.19099

Среди лазерных сред на основе соединений A<sub>2</sub>B<sub>6</sub>, легированных ионами Cr<sup>2+</sup>, кристалл CdSe позволяет получать генерацию в наиболее длинноволновом спектральном диапазоне, достигающем ~ 3.3 μm, что перекрывает область поглощения углеводов. Это делает лазеры на основе активных элементов Cr<sup>2+</sup>:CdSe перспективным инструментом дистанционного детектирования утечек из магистральных газопроводов, а также контроля эмиссии парниковых газов [1]. Однако характерные для кристалла CdSe низкая теплопроводность и высокое значение термооптического коэффициента приводят к возникновению в активных элементах сильных тепловых линз [2]. Из-за этого средняя выходная мощность Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазеров ограничивается уровнем ~ 2 W [1,2]. Преодоление указанного барьера возможно за счет перехода от классической схемы построения лазерного источника к схеме с подвижной активной средой. Уменьшение нагрева активной среды путем механического удаления ее из области накачки и генерации позволяет существенно снизить влияние тепловых эффектов и расширить диапазон работы лазера в режиме генерации одной поперечной моды. Ранее подобный подход был использован для получения мощного непрерывного излучения на кристалле Cr<sup>2+</sup>:ZnSe [3]. Цель настоящей работы — демонстрация возможности многократного увеличения средней мощности генерации Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера по сравнению с достигнутыми ранее результатами за счет использования схемы с подвижной активной средой.

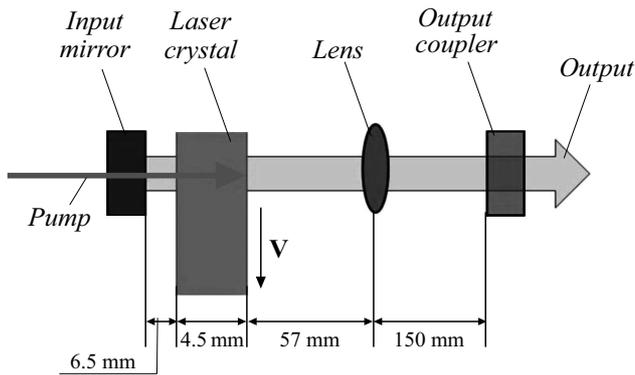
Оптическая схема Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера с подвижной активной средой приведена на рис. 1. Активный элемент Cr<sup>2+</sup>:CdSe с длиной по направлению накачки 4.5 mm

был выращен из паровой фазы специалистами Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по технологии, подробно описанной в работе [4]. Кристалл имел полированные и просветленные торцы. Активная среда перемещалась перпендикулярно оси резонатора со скоростью  $V \sim 28$  m/s.

В качестве источника накачки использовалось излучение непрерывного тулиевого волоконного лазера, генерирующего излучение с длиной волны 1.908 μm. Излучение накачки фокусировалось в активный элемент с помощью линзы с фокусным расстоянием 100 mm, формирующей пятно накачки с диаметром ~ 230 μm. Пропускание активной средой слабого сигнала накачки составляло ~ 15%.

Резонатор был образован двумя зеркалами и внутриврезонаторной линзой. Расстояния между оптическими элементами приведены на рис. 1. Глухое плоское зеркало обладало высоким коэффициентом отражения на рабочей длине волны и пропусканием ~ 99% на длине волны накачки. Выходное сферическое зеркало с радиусом кривизны  $R = 200$  mm обладало коэффициентом отражения ~ 85%. Внутриврезонаторная линза с фокусным расстоянием 50 mm была просветлена в диапазоне длин волн от 1.9 до 2.8 μm.

Расчеты по матричному методу для используемого резонатора показывают, что диаметр основной моды в активном элементе составляет ~ 280 μm и незначительно превышает размер пятна накачки. Таким образом, в исследуемом Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазере реализуется генерация одной поперечной моды. Для условий проведения экспериментов оценочное значение пороговой концентрации возбужденных ионов хрома ~  $1.8 \cdot 10^{17}$  cm<sup>-3</sup>. При



**Рис. 1.** Оптическая схема  $Cr^{2+}$ :CdSe-лазера с подвижной активной средой.

мощности накачки 80 W и эффективности поглощения 82% время, за которое концентрация возбужденных ионов хрома может достигнуть порогового значения, равно  $\sim 0.1 \mu s$ . С другой стороны, время прохождения среды через область накачки составляет  $\sim 10 \mu s$ . Такое соотношение характерных времен позволяет при моделировании считать активную среду неподвижной.

Для расчета лазерных характеристик использовалась двумерная численная модель  $Cr^{2+}$ :CdSe-лазера, основанная на решении одномерных уравнений переноса лазерного излучения. Геометрия задачи цилиндрическая. В численной модели решается совместная система уравнений переноса излучения накачки и генерации, а также уравнений, описывающих кинетику населенностей уровней ионов хрома:

$$\frac{\partial I_1}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial I_1}{\partial t} = (\alpha_{am} - \chi) I_1, \quad (1)$$

$$-\frac{\partial I_2}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial I_2}{\partial t} = (\alpha_{am} - \chi) I_2, \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = k_{pump} - w_{rel} N_2 - \alpha_{am} (I_1 + I_2), \quad (3)$$

$$N_1 + N_2 = N_{Cr}, \quad (4)$$

где  $I_1(z, r)$  и  $I_2(z, r)$  — интенсивности лазерного излучения, распространяющегося в противоположных направлениях,  $\alpha_{am}(z, r)$  — коэффициент усиления,  $\chi$  — коэффициент нерезонансного поглощения в среде,  $n$  — коэффициент преломления в среде,  $N_1(z, r)$ ,  $N_2(z, r)$  — населенности нижнего ( ${}^5T_2$ ) и верхнего ( ${}^5E$ ) лазерных уровней,  $N_{Cr}$  — концентрация ионов  $Cr^{2+}$  в активной среде,  $k_{pump}(z, r)$  — скорость накачки,  $w_{rel}(z, r)$  — скорость релаксации верхнего лазерного уровня.

Для коэффициентов усиления используется выражение

$$\alpha_{am}(\lambda_{gen}) = \sigma_{am}(\lambda_{gen}) N_2 - \sigma_{abs}(\lambda_{gen}) N_1, \quad (5)$$

где  $\lambda_{gen}$  — длина волны лазерного излучения,  $\sigma_{am}(\lambda)$  — сечение усиления,  $\sigma_{abs}(\lambda)$  — сечение поглощения.

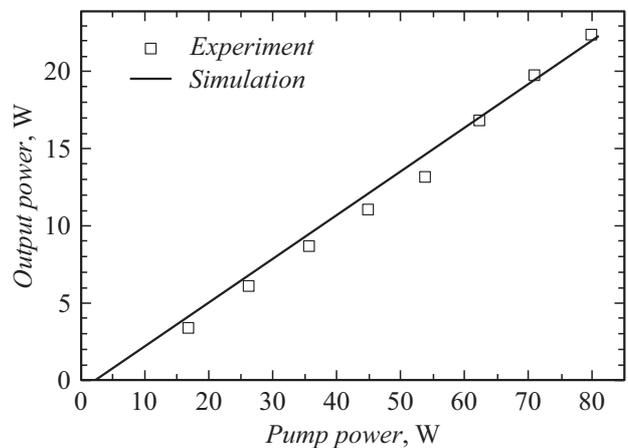
Структура уровней ионов  $Cr^{2+}$  в кристаллах халькогенидов взята из работы [5]. В уравнении (5) используются спектральные зависимости сечений усиления и поглощения из обзора [6]. При моделировании генерации распределение интенсивности лазерного излучения в поперечном направлении на входе в активную среду считается гауссовым. Отметим, что вне активной среды решаются только уравнения переноса лазерного излучения.

На рис. 2 представлены расчетная и экспериментальная зависимости мощности излучения  $Cr^{2+}$ :CdSe-лазера от мощности накачки, падающей на переднюю грань активного элемента. Длина волны генерации в расчете и эксперименте соответствовала максимуму спектра сечения усиления  $2 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2$ . Порог генерации достигался при мощности накачки  $\sim 5 \text{ W}$ . Максимальная мощность генерации составила 22.5 W при дифференциальном КПД  $\sim 30\%$  и максимальном оптическом КПД  $\sim 28\%$ . Дифференциальный КПД генерации оставался практически неизменным вплоть до максимальной доступной в эксперименте мощности накачки  $\sim 80 \text{ W}$ .

В уравнениях (1)–(5) за изменение мощности накачки отвечает скорость накачки  $k_{pump}$ . Кроме нее на мощность генерации в расчете влияет величина внутрирезонаторных потерь  $\gamma$ , определяемая коэффициентом отражения глухого зеркала  $R_1$ , коэффициентом нерезонансного поглощения в среде  $\chi$  и длиной активной среды  $L$ :

$$\gamma = -\ln(R_1) + 2\chi L. \quad (6)$$

Расчетная зависимость мощности генерации  $Cr^{2+}$ :CdSe-лазера от мощности накачки была получена при величине внутрирезонаторных потерь за полный обход резонатора 15.8%. В целом наблюдается неплохое согласие расчета с экспериментом. Довольно высокое значение внутрирезонаторных потерь может быть связано как с качеством просветляющих покрытий на активном элементе, так и с поглощением атмосферы. Небольшие отличия расчетов от экспериментальных



**Рис. 2.** Зависимость средней мощности генерации  $Cr^{2+}$ :CdSe-лазера от мощности накачки, падающей на переднюю грань кристалла.

данных при низких уровнях мощности накачки, скорее всего, связаны с тем, что движение активной среды не учитывалось.

Таким образом, в ходе экспериментов средняя мощность генерации  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера с подвижной активной средой достигала уровня 22.5 W с временной нестабильностью не более 5%. Дифференциальный КПД генерации  $\sim 30\%$  был сравним с дифференциальным КПД  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера с неподвижным активным элементом ( $\sim 31\%$ ) [1]. При этом в представленных в настоящей работе экспериментах не наблюдалось снижения КПД вплоть до максимальной доступной мощности накачки  $\sim 80$  W. Указанный подход особенно актуален для лазеров на основе кристаллов халькогенидов, обладающих высокими значениями термооптического коэффициента, но с успехом может применяться и для других активных сред при разработке систем с высокой выходной мощностью. Следующий этап исследований  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера с подвижной активной средой предполагает получение генерации в спектральной области  $\sim 3.3 \mu\text{m}$ .

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке национального проекта „Наука и университеты“ (проект FSWR-2021-012) 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] Н.Г. Захаров, К.В. Воронцов, Ю.Н. Фролов, С.Д. Великанов, А.В. Мухин, А.В. Ларионов, В.И. Козловский, Ю.В. Коростелин, Ю.П. Подмарьков, Я.К. Скасырский, М.П. Фролов, Краткие сообщения по физике ФИАН, **42** (7), 39 (2015). [N.G. Zakharov, K.V. Vorontsov, Yu.N. Frolov, S.D. Velikanov, A.V. Mukhin, A.V. Larionov, V.I. Kozlovskii, Yu.V. Korostelin, Yu.P. Podmar'kov, Ya.K. Skasyrskii, M.P. Frolov, Bull. Lebedev Phys. Inst., **42** (7), 216 (2015). DOI: 10.3103/S1068335615070052].
- [2] М.К. Тарабрин, Д.В. Устинов, С.М. Томилев, В.А. Лазарев, В.Е. Карасик, В.И. Козловский, Ю.В. Коростелин, Я.К. Скасырский, М.П. Фролов, Opt. Express, **27** (9), 12090 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.012090
- [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] 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. Kozlovskiy, 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].
- [5] К. Грэхэм, В.В. Федоров, С.Б. Милов, М.Е. Дорошенко, Т.Т. Басиев, Ю.В. Орловский, В.В. Осико, В.В. Бадиков, В.Л. Панютин, Квантовая электроника, **34** (1), 8 (2004). [K. Graham, V.V. Fedorov, S.B. Mirov, M.E. Doroshenko, T.T. Basiev, Yu.V. Orlovskii, V.V. Osiko, V.V. Badikov, V.L. Panyutin, Quantum Electron., **34** (1), 8 (2004). DOI: 10.1070/QE2004v034n01ABEH002571].
- [6] M. Bass, G. Line, E. Stryland, *Handbook of optics* (McGraw-Hill Companies, 2010), vol. 4.