

# Генерация лазера на поликристаллическом $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ с нелегированными торцами

Д.В.Савин, Е.М.Гавришук, В.Б.Иконников, О.Н.Еремейкин, А.С.Егоров

*Предложена оригинальная методика изготовления образцов поликристаллического  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  с нелегированными торцами. Проведены исследования генерационных характеристик лазера на  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  при импульсно-периодической накачке  $\text{Tm}^{3+}:\text{YLF}$ -лазером. Получена эффективность преобразования излучения накачки в лазерную генерацию на длине волны 2350 нм, равная 20%. Продемонстрирована повышенная лазерная стойкость образцов  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  к пробоям поверхности.*

**Ключевые слова:** диодная накачка,  $\text{Tm}^{3+}:\text{YLF}$ -лазер,  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер, нелегированные торцы.

Среди множества материалов, используемых в качестве активных сред при создании фемтосекундных и перестраиваемых лазеров среднего ИК диапазона длин волн, наиболее перспективными являются халькогениды цинка, легированные ионами переходных металлов [1, 2]. Усилия исследователей в последние годы направлены на повышение эффективности и выходной мощности лазерного излучения, что необходимо для конструирования компактных источников когерентного излучения, перестраиваемого в диапазоне 2–3 мкм [3–5]. Как показано в [6], профиль распределения легирующего компонента определяет профиль поглощенной энергии, что в свою очередь существенным образом влияет на эффективность и абсолютные значения параметров лазерной генерации. При высоких плотностях мощности излучения существует большая вероятность лазерного пробоя поверхности легированного оптического элемента вследствие высокой концентрации легирующего компонента. Эту проблему можно решить, обеспечивая его минимальную (или нулевую) концентрацию на поверхности, через которую осуществляется ввод и вывод лазерного излучения, а максимальную – в объеме образца.

**Д.В.Савин, Е.М.Гавришук, В.Б.Иконников.** Институт химии высококичистых веществ им Г.Г.Десятых РАН, Россия, 603950, Н.Новгород, ул. Тропинина, 49; Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23; e-mail: savin@ihps.nnov.ru, gavr@ihps.nnov.ru, ikonnikov@ihps.nnov.ru

**О.Н.Еремейкин.** Институт химии высококичистых веществ им. Г.Г.Десятых РАН, Россия, 603950, Н.Новгород, ул. Тропинина, 49; Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23; ООО «Интеллектуальные системы НН», Россия, Нижегородская обл., 606026 Дзержинск, ул. Будённого, 5в, офис 103; e-mail: eremeikin@ihps.nnov.ru

**А.С.Егоров.** Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23; ООО «Интеллектуальные системы НН», Россия, Нижегородская обл., 606026 Дзержинск, ул. Будённого, 5в, офис 103; e-mail: aegorovnn@yandex.ru

Поступила в редакцию 12 ноября 2014 г., после доработки – 26 ноября 2014 г.

В настоящей работе сообщается о результатах исследований генерационных характеристик лазера на образцах поликристаллического  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ , полученных по оригинальной методике, которая позволяет создавать нулевую концентрацию легирующего компонента на поверхности образца и максимальную – в его объеме.

Предварительно полученные CVD-методом образцы поликристаллического  $\text{ZnSe}$  высокого оптического качества размером  $10 \times 15 \times 3$  мм были отполированы абразивным алмазным порошком с размером зерна 1 мкм, промыты в ультразвуковой ванне и помещены в реактор, традиционно используемый для синтеза  $\text{ZnSe}$ . В CVD-реактор был введен узел подачи паров прекурсора хрома, оборудованный системой независимого нагрева и высокоточным устройством поддержания температуры испарителя. Подача паров прекурсора хрома в реактор осуществлялась потоком газа носителя (аргона). Химическое осаждение металлической пленки Cr на поверхности полированных подложек  $\text{ZnSe}$  проводилось с использованием реакции восстановления трихлорида хрома парами цинка.

После осаждения пленки хрома заданной толщины на поверхность  $\text{ZnSe}$  подача прекурсора прекращалась, и в реакционную зону подавался селеноводород, разбавленный аргоном, для осаждения  $\text{ZnSe}$ . Синтез селенида цинка проводился по методике, подробно описанной в [7]. Процесс выращивания слоев  $\text{ZnSe}$  осуществлялся в течение 48–72 ч (в зависимости от требуемой толщины осадка). В результате эксперимента получали трехслойные структуры  $\text{ZnSe}-\text{Cr}-\text{ZnSe}$  толщиной до 6–8 мм. Выращенные образцы извлекались из CVD-реактора и механически обрабатывались для придания им необходимой геометрической формы. Затем они отжигались в вакуированных кварцевых ампулах при температуре  $1050^\circ\text{C}$  в атмосфере аргона под давлением около 1 атм в течение 5–7 суток. Существенное ускорение процесса получения необходимого концентрационного профиля хрома достигалось при баротермической обработке синтезированных структур. Для этого отжиг проводился в газостате при давлении 1000 атм и температуре  $1100-1250^\circ\text{C}$  в течение 24–36 ч.

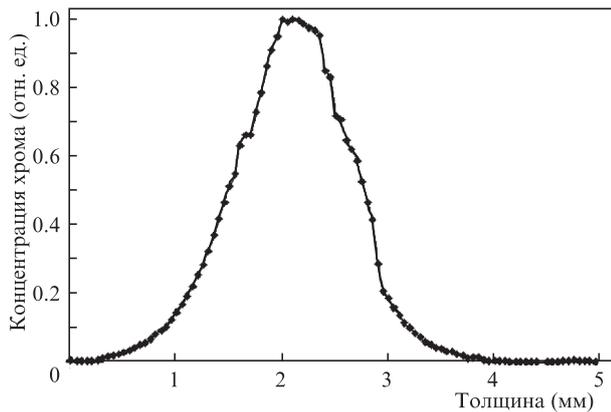


Рис.1. Нормированный профиль распределения хрома по толщине образца  $\text{ZnSe}$  толщиной 5 мм.

Концентрация хрома в полученных образцах, определенная методом ИК фурье-спектроскопии, находилась на уровне  $10^{18}$ – $10^{19}$   $\text{см}^{-3}$  и зависела от условий проведения эксперимента. Распределение хрома в образцах определялось оптическим методом с использованием излучения  $\text{Tm}:\text{YLF}$ -лазера на длине волны 1908 нм [8]. Концентрационный профиль одного из полученных образцов  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  представлен на рис.1. Видно, что максимальная концентрация хрома достигается в объеме образца, а вблизи поверхности она ниже предела определения.

Лазерный элемент, вырезанный из кристалла  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ , не имел просветляющих покрытий. Пластины  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  располагались под углом Брюстера к оптической оси резонатора (рис.2) и зажимались в медный радиатор через индиевую прокладку без активного охлаждения. Возбуждение кристалла осуществлялось на длине волны  $\lambda_p = 1908$  нм излучением  $\text{Tm}:\text{YLF}$ -лазера с диодной накачкой, работающего в импульсно-периодическом режиме. Длительность импульсов  $\text{Tm}:\text{YLF}$ -лазера составляла 500 – 1000 нс (в зависимости от мощности) при частоте следования  $f = 10$  кГц. Излучение лазера накачки 1 фокусировалось системой линз 2 через дихроичное зеркало 3 внутрь образца  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  4 в пятно диаметром  $\sim 600$  мкм. Резонатор длиной 60 мм формировался дихроичным зеркалом 3 и плосковогнутым выходным зеркалом 5 (коэффициент отражения  $\sim 80\%$  в диапазоне 2.3–2.4 мкм) с радиусом кривизны  $R = -300$  мм. Мощность лазерного излучения измерялась калиброванным измерителем мощности Gentec, чувствительным в спектральной области 0.5–10 мкм. Временные параметры генерации измерялись фотоприемником на основе КРТ-структуры с постоянной времени  $\sim 5 \times 10^{-9}$  с. Спектральный анализ выходного излучения осуществлялся дифракционным монохроматором Solar M833 с разрешением 0.5 нм.

Проводилось сравнение генерационных характеристик поликристаллических образцов  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  с мини-

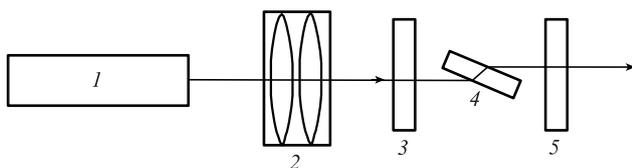


Рис.2. Схема  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера: 1 –  $\text{Tm}:\text{YLF}$ -лазер; 2 – система линз; 3 – дихроичное зеркало; 4 – активный элемент из  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ ; 5 – выходное зеркало.

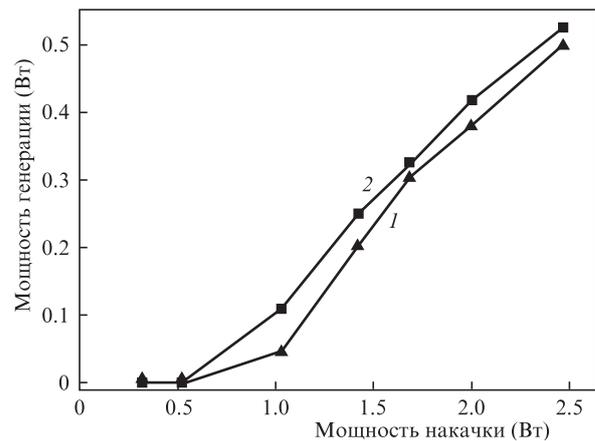


Рис.3. Зависимости выходной мощности  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера от входной мощности накачки для активного элемента с «минимальной» (1) и «максимальной» (2) поверхностными концентрациями хрома.

мальной концентрацией хрома на поверхности, полученных по представленной здесь методике, и поликристаллических образцов с максимальной концентрацией хрома на поверхности, полученных по традиционной методике [9]. Эффективные концентрации хрома в исследованных образцах были близки и составляли  $\sim 2 \times 10^{19}$   $\text{см}^{-3}$ . Активные элементы не имели просветляющих покрытий. При мощности излучения накачки  $\sim 2.5$  Вт были получены близкие значения ( $\sim 0.5$  Вт) средней мощности генерации (рис.3). Большая пороговая мощность у образцов  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  с нелегированными торцами, вероятно, обусловлена неоптимальными условиями легирования и вследствие этого – большими потерями на рассеяние. Максимальная мощность и эффективность лазерной генерации ограничивалась мощностью накачки и высокой частотой следования импульсов накачки.

Спектры генерации обоих образцов существенно не различались, при увеличении мощности накачки они смещались в длинноволновую область, приближаясь к максимуму на 2350 нм полосы усиления активной среды при ширине линии 50–70 нм.

Проведенные оценки плотности мощности, при которой наблюдался поверхностный пробой в образцах нелегированного  $\text{ZnSe}$  и в образцах с максимальной и минимальной поверхностными концентрациями хрома при острой фокусировке излучения накачки на длине волны 1908 нм (длительность импульсов  $\sim 100$  нс), показали ее существенное различие для образцов нелегированного  $\text{ZnSe}$  и образцов с максимальной поверхностной концентрацией хрома ( $\sim 5.6$  и  $\sim 2.5$  Дж/см<sup>2</sup> соответственно). При этом плотности мощности для образцов с минимальной концентрацией хрома на поверхности и образцов из нелегированного  $\text{ZnSe}$  практически не отличались друг от друга.

Дальнейшая оптимизация способа изготовления структур  $\text{ZnSe}-\text{Cr}+\text{ZnSe}-\text{ZnSe}$ , по-видимому, позволит существенно повысить лазерную стойкость оптических элементов и эффективность генерации, особенно в области высоких мощностей излучения.

Таким образом, получены образцы поликристаллического  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  с максимальной концентрацией хрома в объеме образца и нулевой на поверхностях, через которые осуществляется ввод и вывод лазерного излучения. Сравнение эффективностей генерации на образцах  $\text{Cr}^{2+}:$

ZnSe с нелегированными торцами и изготовленных по традиционной методике показало близость их параметров. Продемонстрирована повышенная стойкость полученных образцов  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  к лазерному пробою поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта МОН РФ и ННГУ (соглашение от 27 августа 2013г. № 02. В.49.21.0003).

1. Mirov S.B., Fedorov V.V., Martyshkin D.V., Moskalev I.S., Mirov M.S., Gapontsev V.P. *Opt. Mat. Express*, **5**, 898 (2011).
2. Sorokin E., Tolstik N., Sorokina I. T. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8599**, 859916 (2013).
3. Demirbas U., Sennaroglu A. *Opt. Lett.*, **31**, 2293 (2006).
4. Егоров А.С., Еремейкин О.Н., Павленко К.Ю., Савикин А.П., Шарков В.В. *Квантовая электроника*, **42**, 1106 (2012).
5. Bernhardt V., Sorokin E., Jacquet P., Thon R., Becker T., Sorokina I.T., Picqué N., Hänsch T.W. *Appl. Phys. B*, **100**, 3 (2010).
6. Rapoport W.R., Shand M.L. US Patent WO 94/05062.
7. Гавришук Е.М. *Неорганические материалы*, **39**, 1031 (2003).
8. Родин С.А., Балабанов С.С., Гавришук Е.М., Еремейкин О.Н. *Оптический журн.*, **80**, 89 (2013).
9. Андронов А.А., Балабанов С.С., Гавришук Е.М., Еремейкин О.Н., Захаров Н.Г., Савикин А.П., Тимофеева Н.А., Шарков В.В. *Квантовая электроника*, **40**, 1109 (2010).