

# Перестраиваемый лазер на поликристаллическом Cr: ZnSe с импульсно-периодической накачкой

Е. С. Воропай, Р. А. Пахоменко

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,  
e-mail: [ruslanpahomenko@mail.ru](mailto:ruslanpahomenko@mail.ru)

На поликристаллическом Cr<sup>2+</sup>:ZnSe при накачке на длине волны 1.908 мкм излучением Tm:YLF-лазера с диодной накачкой, работающего в режиме модуляции добротности (частота следования импульсов 3 кГц), в области 2.32 мкм получена эффективная генерация (полный КПД  $\approx 38\%$ ) при средней мощности генерации  $\approx 3$  Вт (длительность импульса  $\sim 40$  нс). Получена перестройка в диапазоне длин волн 2170–2400 нм с шириной линии  $\sim 10$  нм.

**Ключевые слова:** лазер на кристалле Tm:YLF, диодная накачка, модуляция добротности, лазер на поликристаллическом Cr<sup>2+</sup>:ZnSe.

## Tunable laser on polycrystalline Cr: ZnSe with pulse-periodic pumping

E. S. Voropai, R. A. Pakhomenko

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: [ruslanpahomenko@mail.ru](mailto:ruslanpahomenko@mail.ru)

On polycrystalline Cr<sup>2+</sup>:ZnSe, pumped at a wavelength of 1.908  $\mu\text{m}$  by a diode-pumped Tm:YLF-laser operating in the Q-switched mode (pulse repetition rate of 3 kHz), efficient lasing (total efficiency  $\approx 38\%$ ) was achieved in the 2.32  $\mu\text{m}$  region with an average lasing power of  $\approx 3$  W (pulse duration  $\sim 40$  ns). Tunability was achieved in the wavelength range of 2170–2400 nm with a linewidth of  $\sim 10$  nm.

**Keywords:** Tm:YLF laser, diode pumping, Q-switching, polycrystalline Cr<sup>2+</sup>:ZnSe laser

### Введение

Одно из перспективных направлений создания твердотельных источников когерентного излучения среднего ИК диапазона для решения таких прикладных задач, как лазерная спектроскопия, медицинская диагностика и экологический мониторинг, основано на использовании кристаллов халькогенидов (ZnS, ZnSe, CdSe и др.), легированных ионами переходных металлов (Cr, Co, Ni, Fe). В частности, лазеры на кристаллах Cr<sup>2+</sup>:ZnSe и Cr<sup>2+</sup>:ZnS имеют полосу перестройки 2.1–3.1 мкм [1–3].

Полоса поглощения кристалла Cr<sup>2+</sup>:ZnSe с максимумом на длине волны 1,8 мкм (ширина полосы  $\sim 300$  нм) определяет выбор источников накачки. Наряду с диодными лазерами [4], для накачки применяются тулиевые волоконные [5] или кристаллические лазеры [6–8], излучающие в диапазоне длин волн 1.8–2 мкм.

Была продемонстрирована возможность эффективного возбуждения лазера на поликристалле Cr<sup>2+</sup>:ZnSe излучением импульсно-периодического Tm:YLF-лазера, работающего в режиме модуляции добротности при использовании акустооптического модулятора [9].

Это обеспечивает высокую импульсную мощность (несколько десятков киловатт) при частоте следования импульсов в несколько килогерц и делает

перспективным использование лазера в аналитической спектроскопии с регистрацией сигнала методом синхронного детектирования.

В работе представлены результаты исследования генерационных характеристик эффективного перестраиваемого лазера на поликристаллическом  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  с импульсно-периодической накачкой.

## 1. Описание экспериментальной установки

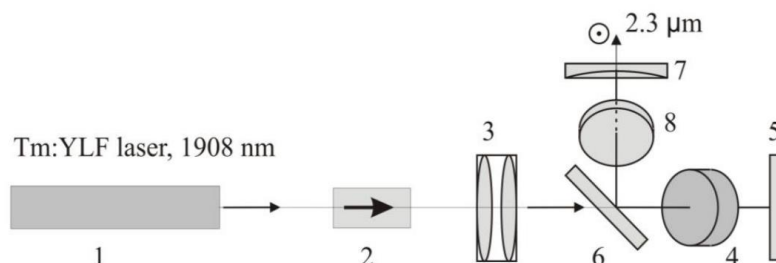


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – Tm:YLF-лазер; 2 – оптическая развязка; 3 – система линз; 4 – активный элемент из  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ ; 5 – «глухое» зеркало; 6 – дихроичное зеркало; 7 – выходное зеркало; 8 – фильтр Лيو

Использовался образец поликристаллического  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ , полученный методом высокотемпературной диффузии [9]. Для уменьшения поверхностного поглощения была проведена более тщательная полировка поверхностей образца.

Для оптической накачки образца  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  использовался импульсно-периодический Tm: YLF-лазер с диодной накачкой, генерирующий линейно поляризованное излучение на длине волны 1908 нм.

При частоте модуляции 3 кГц длительность импульсов генерации составляла ~70 нс при средней мощности до 8 Вт. Излучение Tm:YLF-лазера 1 после прохождения системы оптической развязки 2, состоящей из поляризационного клина и четвертьволновой пластинки, приобретало круговую поляризацию, после чего фокусировалось системой линз 3 внутрь образца  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  4 (толщина образца ~3.6 мм, диаметр 20 мм) (рис. 1). При этом диаметр пучка накачки в перетяжке составлял ~550 мкм.

Образец был закреплен в медной оправе без дополнительного охлаждения и ориентирован в схеме резонатора под углом Брюстера. Резонатор формировался зеркалами 5, 6 и 7. Плоское зеркало 5 имело высокий коэффициент отражения на длинах волн 1.9–2.5 мкм (не менее 99.5 %), что позволяло увеличить долю поглощенной мощности накачки за счет двойного прохода пучка накачки через активный элемент.

Дихроичное зеркало 6 имело высокое отражение в диапазоне 2.1–2.5 мкм ( $\approx 99\%$  для вертикальной поляризации) и высокий коэффициент пропускания на длине волны накачки ( $\approx 90\%$ ). В качестве выходного использовалось сферическое зеркало 7 с кривизной  $R = 300$  мм и коэффициентом пропускания на длине волны генерации  $\sim 80\%$ .

Выбранная конфигурация резонатора обеспечивала хорошее согласование области накачки с основной модой резонатора (диаметр ~500÷600 мкм) в

возможном диапазоне значений тепловой линзы (с фокусным расстоянием от 30 см до 300 см), наводимой в активном элементе.

Для перестройки спектра генерации внутрь схемы помещался фильтр Лио 8, состоящий либо из двух кварцевых пластин с толщиной 0.8 мм и 2.56 мм, либо из одной пластинки толщиной 6 мм, ориентированных под углом Брюстера к оси резонатора (рис. 1).

## 2. Результаты и их обсуждение

Порог генерации составлял  $\sim 0.2$  Вт. При мощности накачки  $P_{\text{pump}} \approx 7.9$  Вт (с учетом потерь на дихроичном зеркале) средняя мощность генерации имела величину  $P_{\text{gen}} \approx 3$  Вт (рис. 2).

Помимо потерь на дихроичном зеркале значительная часть мощности накачки ( $\sim 25\%$ ) терялась при отражении излучения с круговой поляризацией от входного торца активного элемента. При этом поглощение мощности накачки в образце  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ , ориентированном под углом Брюстера, составляло  $\sim 70\%$ . Полный КПД лазера при коэффициенте пропускания выходного зеркала  $\sim 20\%$  составил  $\eta \sim 38\%$ , что соответствовало дифференциальной эффективности по поглощенной мощности  $\eta_{\text{abs}} \sim 75\%$ .

При средней мощности генерации  $P_{\text{gen}} \approx 3$  Вт длительность импульса генерации  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  лазера равнялась  $\Delta t_{\text{gen}} \approx 40$  нс, что соответствует импульсной мощности генерации  $P_{\text{puls}} \approx 25$  кВт с энергией в импульсе  $E \approx 1$  мДж. Лазер генерировал линейно поляризованное излучение, что наряду с ориентацией активного элемента определялось селективными свойствами дихроичного зеркала 6, вносящего наименьшие потери для вертикальной поляризации.

Спектр генерации в неселективном резонаторе находился в области  $\lambda = 2.32$  мкм, соответствующей достаточно широкому максимуму спектра люминесценции  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  [1, 9, 10]. Ширина линии генерации по уровню 0.5 составляла  $\Delta\lambda \approx 50$  нм. Использование фильтра Лио, состоящего из двух кварцевых пластин (с толщиной 0.8 мм и 2.56 мм) обеспечивало перестройку длины волны генерации в диапазоне  $\Delta\lambda \approx 2170 \div 2400$  нм с шириной линии  $\delta\lambda \approx 10 \div 15$  нм (рис. 3).

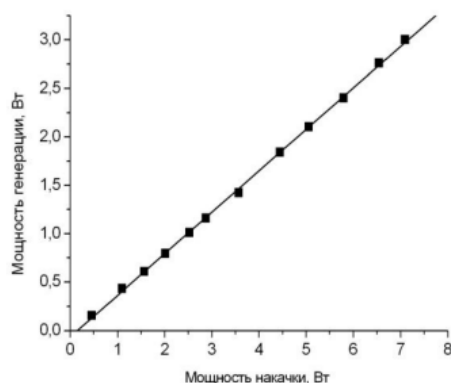


Рис. 2. Зависимость средней мощности генерации лазера на  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  от мощности Tm:YLF-лазера накачки

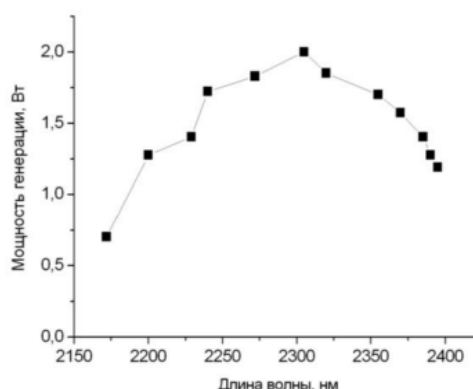


Рис. 3. Перестроечная кривая спектра генерации лазера на  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$

Снижение мощности генерации в максимуме перестроечной кривой составляло  $\sim 15\%$  в сравнении с неселективным резонатором. Длинноволновая граница диапазона перестройки была обусловлена резким снижением коэффициента отражения зеркал резонатора.

При помещении внутрь резонатора одной кварцевой пластинки толщиной 6 мм в спектре генерации наблюдались два максимума с шириной  $\delta\lambda \approx 4$  нм по уровню 0.5 и расстоянием между максимумами генерации  $\Delta\lambda \approx 80$  нм. Это позволило найти фактор резкости фильтра  $F = \Delta\lambda/\delta\lambda$ . Величина  $F = 20$  свидетельствует о хороших селективирующих свойствах фильтра Лию в данном лазере, несмотря на малую длительность импульса генерации и большие поляризационные потери, вносимые дихроичным зеркалом.

## Выводы

В работе исследованы генерационные характеристики лазера на поликристаллическом  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ , помещенного в неселективный и селективный резонаторы, при оптической накачке излучением  $\text{Tm}:\text{YLF}$ -лазера на длине волны 1.908 мкм, работающего в импульсно-периодическом режиме генерации (частота следования импульсов 3 кГц), с непрерывной диодной накачкой.

Получена эффективная генерация со средней мощностью до 3 Вт (полный КПД  $\sim 38\%$ ) и с энергией в импульсе  $\approx 1$  мДж на длине волны  $\lambda = 2.32$  мкм, а также получена перестройка в диапазоне длин волн 2170–2400 нм с шириной линии около 10 нм.

## Библиографические ссылки

1. Sorokina I. T. Cr-doped II–VI materials for lasers and nonlinear optics // Optical Materials. 2004. V. 26, Iss. 4. P. 395–412.
2. Импульсные  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ - и  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазеры среднего ИК диапазона с накачкой неодимовыми лазерами с модуляцией добротности и сдвигом частоты излучения с помощью ВКР / К. Грэхэм [и др.] // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, № 1. С. 8–14.
3. Спектральная динамика внутрирезонаторного поглощения в импульсном  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазере / В. А. Акимов [и др.] // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 5. С. 425–428.
4. Moskalev I. S. InP diode-pumped  $\text{Cr}:\text{ZnS}$  and  $\text{Cr}:\text{ZnSe}$  highly efficient, widely tunable, mid-IR lasers / I. S. Moskalev, V. V. Fedorov, S. B. Mirov // Proc. SPIE. 2010. V. 7578. Paper 75781K.
5. Peterson R. D., Schepler K. L. 1.9  $\mu\text{m}$ -Fiber-Pumped  $\text{Cr}:\text{ZnSe}$  Laser // Advanced Solid-State Photonics. 2005 / Eds. by C. Denman and I. Sorokina / V. 98 of OSA Trends in Optics and Photonics (Optical Society of America). Paper 236.
6. High-Power and Q-Switched  $\text{Cr}:\text{ZnSe}$  Lasers / W. J. Alford [et al.] // Advanced Solid-State Photonics. 2003 / Ed. by J. Zayhowski, V. 83 of OSA Trends in Optics and Photonics (Optical Society of America). Paper 13.
7. Laser action in bulk  $\text{Cr}:\text{ZnSe}$  crystals / P. Koranda [et al.] // Proc. SPIE. 2008. V. 6998. Paper 69980R.
8. Эффективная генерация на длине волны 1908 нм в лазере на кристалле  $\text{Tm}:\text{YLF}$  с диодной накачкой / Н. Г. Захаров [и др.] // Квантовая электроника. 2009. Т. 39, № 5. С. 410–414.
9. Генерация лазера на поликристаллическом  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  с накачкой излучением импульсно-периодического  $\text{Tm}:\text{YLF}$  лазера / А. А. Андронов [и др.] // Квантовая электроника. 2010. Т. 40, № 12. С. 1109–1111.
10. Moskalev I. S. Tunable, Single-Frequency, and Multi-Watt Continuous-Wave  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  Lasers / I. S. Moskalev, V. V. Fedorov, S. B. Mirov // Optics Express. 2008. V. 16, Iss. 6. P. 4145–4153.