

Генерация лазера на поликристаллическом $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnSe}$ с накачкой излучением импульсно-периодического $\text{Tm} : \text{YLF}$ -лазера

А.А.Андронов, С.С.Балабанов, Е.М.Гаврищук, О.Н.Еремейкин,
Н.Г.Захаров, А.П.Савикин, Н.А.Тимофеева, В.В.Шарков

Исследованы генерационные характеристики лазера на поликристаллическом $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnSe}$, полученном методом диффузионного отжига, при накачке излучением $\text{Tm} : \text{YLF}$ -лазера на длине волны 1.908 мкм, работающего в режиме модуляции добротности (частота следования импульсов 2 кГц) с непрерывной диодной накачкой. В области 2.32 мкм получена эффективная (полный КПД $\sim 17\%$) импульсно-периодическая генерация (длительность импульса ~ 45 нс) при средней мощности ~ 1 Вт.

Ключевые слова: $\text{Tm} : \text{YLF}$ -лазер, диодная накачка, модуляция добротности, лазер на поликристаллическом $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnSe}$.

В последние годы наблюдается повышенный интерес к вопросам разработки высокоэффективных компактных лазерных источников диапазона 2–5 мкм, соответствующего интенсивным линиям поглощения большинства молекул, что расширяет возможности лазерной спектроскопии молекулярных газов для решения таких прикладных задач, как медицинская диагностика и экологический мониторинг.

Квантовые каскадные лазеры, непосредственно генерирующие излучение в среднем ИК диапазоне, активно развиваются во всем мире вот уже более 15 лет [1, 2]. Однако по энергетике (в отдельном чипе) они пока не могут конкурировать с твердотельными лазерными системами.

Среди направлений разработки твердотельных источников когерентного излучения среднего ИК диапазона можно выделить два наиболее перспективных. Первое направление связано с использованием параметрических генераторов света [3]. К недостаткам параметрического преобразования в нелинейных кристаллах следует отнести высокий порог возбуждения, а также низкую частотную и амплитудную стабильность генерации. От этих недостатков свободны лазеры второго направления, использующие кристаллы халькогенидов (ZnS , ZnSe , CdSe и др.), легированные ионами переходных металлов (Cr , Co , Ni , Fe). В частности, лазеры на кристаллах $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnSe}$ и $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnS}$ имеют полосу перестройки 2.1–3.1 мкм [4–6].

Полоса поглощения кристалла $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnSe}$ с максимумом на длине волны 1.8 мкм и шириной ~ 300 нм определяет выбор источников накачки. Наряду с диодными лазерами [7] для накачки применяются тулиевые воло-

конные [8] или кристаллические лазеры [9, 10], излучающие в диапазоне длин волн 1.8–2 мкм, что обеспечивает наименьшую разность между энергиями квантов накачки и рабочего перехода ионов Cr^{2+} и тем самым снижает тепловыделение и повышает КПД.

Цель настоящей работы – исследование возможности применения эффективного компактного $\text{Tm} : \text{YLF}$ -лазера, работающего в импульсно-периодическом режиме генерации, для накачки лазера на поликристаллическом $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnSe}$. Импульсно-периодический режим генерации, обеспечивающий большую импульсную мощность (несколько десятков киловатт) при частоте следования импульсов в несколько килогерц, делает перспективным использование лазера в аналитической спектроскопии с регистрацией сигнала методом синхронного детектирования.

Используемый в эксперименте легированный хромом ZnSe был синтезирован методом высокотемпературной диффузии. Для легирования использовались образцы полученного методом CVD поликристаллического ZnSe в форме таблеток диаметром 20 мм и толщиной 4 мм, на обе стороны которых путем электронно-лучевого испарения была нанесена пленка металлического хрома толщиной ~ 1 мкм. Диффузионный отжиг проводился в кварцевых ампулах в атмосфере аргона при температуре 900 °С в течение 13 суток. С целью достижения однородности распределения легирующего элемента полученные образцы были подвергнуты газостатической обработке в течение 30 ч при давлении 190 МПа и температуре 980 °С.

Образцы $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnSe}$ были отполированы с двух сторон и проанализированы методом ИК фурье-спектроскопии. Все образцы имели полосу поглощения с максимумом в области 1.77 мкм; концентрация ионов Cr^{2+} была на уровне 10^{18} ат/см³.

Для оптической накачки образца $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnSe}$ использовался ранее разработанный $\text{Tm} : \text{YLF}$ -лазер с диодной накачкой, генерирующий линейно поляризованное излучение на длине волны 1908 нм [11]. Для обеспечения работы лазера в импульсно-периодическом режиме внутри

А.А.Андронов, О.Н.Еремейкин, Н.Г.Захаров, А.П. Савикин, В.В. Шарков. Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23; e-mail: eon@rambler.ru, savikin@rf.unn.ru
С.С.Балабанов, Е.М.Гаврищук, Н.А.Тимофеева. Институт химии высококочистых веществ РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

Поступила в редакцию 13 сентября 2010 г., после доработки – 10 ноября 2010 г.

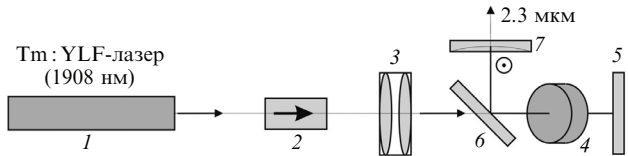


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

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.

схемы помещался акустооптический модулятор. При частоте модуляции 2 кГц длительность импульсов генерации составляла ~ 80 нс при средней мощности 6 Вт.

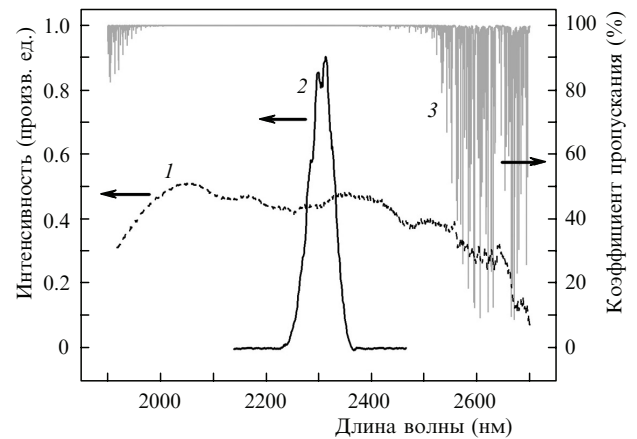
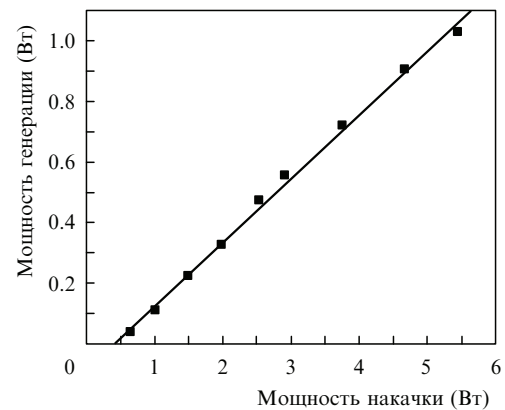
Излучение Tm:YLF-лазера 1 после прохождения системы оптической развязки 2, состоящей из поляризационного клина и четвертьволновой пластинки, приобретало круговую поляризацию, после чего фокусировалось системой линз 3 внутри образца $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 4 (рис.1). Диаметр пучка накачки в перетяжке 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 (не менее 99.5%) коэффициент отражения на длинах волн 1.9–2.5 мкм, что позволяло увеличить долю поглощенной мощности накачки за счет двойного прохода пучка накачки через активный элемент. Дихроичное зеркало 6 имело высокий коэффициент отражения в диапазоне 2.1–2.5 мкм (около 99% для вертикальной поляризации) и высокий коэффициент пропускания на длине волны накачки (около 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 фокусных расстояний тепловой линзы (30–300 см), наводимой в активном элементе.

Измерения мощности проводились градуированным приемником широкой апертуры (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. Сигнал с фотоприемника регистрировался осциллографом LeCroy 62Xi с полосой пропускания 600 МГц. Спектральный анализ выходного излучения в диапазоне 1.9–2.7 мкм проводился с помощью монохроматора МДР-41.

Для исследования спектра люминесценции и генерации использовался фотоприемник ФСА-Г1 на основе PbS с длинноволновой границей чувствительности ~ 2.7 мкм. В длинноволновой части спектра люминесценции образца $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ в области длин волн 2.5–2.7 мкм наблюдались провалы, которые можно объяснить поглощением излучения парами воды [12] (рис.2).

Предварительно измеренное поглощение мощности линейно поляризованного излучения накачки (p-поляризация) в образце $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, ориентированном под углом Брюстера, составляло примерно 70%, что соответствовало коэффициенту поглощения $\sim 2.8 \text{ см}^{-1}$ на длине волн $\lambda = 1908$ нм.

Порог генерации лазера составлял около 0.4 Вт, а средняя мощность генерации $P_{\text{gen}} \approx 1$ Вт достигалась при

Рис.2. Спектр люминесценции образца $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, снятый со спектральным разрешением ~ 1 нм (1); спектр генерации лазера на $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ (2); спектр пропускания атмосферы [12] (длина пути 0.1 м) (3).Рис.3. Зависимость средней мощности генерации лазера на $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ от мощности излучения Tm:YLF-лазера накачки.

мощности накачки $P_p \approx 5.4$ Вт (с учетом потерь на дихроичном зеркале) (рис.3). Спектр генерации находился в области $\lambda = 2.32$ мкм (рис.2), соответствующей достаточно широкому максимуму спектра люминесценции $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, как и у аналогичных активных сред [4, 13]. Ширина линии генерации $\Delta\lambda$ по уровню 0.5 была ~ 55 нм.

Помимо потерь на дихроичном зеркале значительная часть мощности накачки ($\sim 25\%$) терялась при отражении излучения с круговой поляризацией от входного торца активного элемента. Полный КПД лазера η при коэффициенте пропускания выходного зеркала 20% составил 17%, что соответствовало дифференциальной эффективности по поглощенной мощности $\eta_{\text{abs}} \sim 38\%$. Лазер генерировал линейно поляризованное излучение, что наряду с ориентацией активного элемента определялось селективными свойствами дихроичного зеркала, вносящего наименьшие потери для вертикальной поляризации.

При длительности импульсов накачки $\Delta t_p \approx 80$ нс (частота следования импульсов 2 кГц, $P_p = 6$ Вт) длительность импульса генерации $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера $\Delta t_{\text{gen}} \approx 45$ нс при средней мощности $P_{\text{gen}} \approx 1$ Вт (рис.4). Данным параметрам соответствует импульсная мощность генерации $P_{\text{puls}} \approx 10$ кВт с энергией в импульсе 0.45 мДж. Следует отметить гладкую форму импульса генерации $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера в нашей схеме, не имеющей осцилляций на переднем фронте, которые наблюдались в [9].

Таким образом, в настоящей работе исследованы генерационные характеристики лазера на поликристалли-

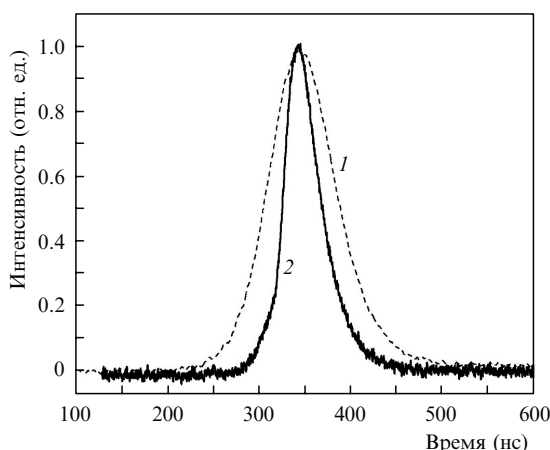


Рис.4. Оциллограммы импульса накачки (1) и генерации лазера на $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ (2).

ческом $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$, полученном методом диффузионного отжига. Показана возможность эффективного возбуждения (полный КПД равен $\sim 17\%$) излучением Tm:YLF-лазера на длине волны 1.908 мкм, работающего в импульсно-периодическом режиме генерации (частота следования импульсов 2 кГц) при непрерывной диодной накачке. В области длины волны 2.32 мкм получена генерация со средней мощностью примерно 1 Вт.

Работа выполнена при финансовой поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект № 2.1.1/3603), а также ФЦП «Научные и научно-педа-

гогические кадры инновационной России» (контракт № 02.740.11.0563).

1. Faist J., Capasso F., Sivco D.L., Sirtori C., Hutchinson A.L., Cho A.Y. *Science*, **264**, 553 (1994).
2. Bai Y., Sliviken S., Darvish S.R., Hadaddi A., Gokden B., Razeghi M. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 221104 (2009).
3. Godard A. *C.R. Physique*, **8**, 1100 (2007).
4. Sorokina I.T. *Opt. Mater.*, **26**, 395 (2004).
5. Грэхэм К., Фёдоров В.В., Милов С.Б., Дорошенко М.Е., Басиев Т.Т., Орловский Ю.В., Осико В.В., Бадиков В.В., Панютин В.Л. *Квантовая электроника*, **34** (1), 8 (2004).
6. Акимов В.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **35** (5), 425 (2005).
7. Moskalev I.S., Fedorov V.V., Mirov S.B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7578**, 75781K (2010); doi:10.1117/12.841377.
8. Peterson R.D., Schepler K.L., in *Trends in Optics and Photonics*. Ed. by C.Denman, I.Sorokina (Washington, DC, Optical Society of America, 2005, vol. 98, paper 236).
9. Alford W.J., Wagner G.J., Sullivan A.C., Keene J.A., Carrig T.J., in *Trends in Optics and Photonics*. Ed. by J.Zayhowski (Washington, DC, Optical Society of America, 2003, vol. 83, paper 13).
10. Koranda P., Jelínková H., Němec M., Šulc J., Doroshenko M., Basiev T.T., Komar V.K., Gerasimenko A.S., Badikov V.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6998**, 69980R (2008).
11. Захаров Н.Г., Антипов О.Л., Савикин А.П., Шарков В.В., Еремейкин О.Н., Фролов Ю.Н., Мищенко Г.М., Великанов С.Д. *Квантовая электроника*, **39** (5), 410 (2009).
12. Информационная система 'SPECTRA' (<http://spectra.iao.ru/>).
13. Moskalev I.S., Fedorov V.V., Mirov S.B. *Opt. Express*, **16** (6), 4145 (2008).