

## Генерационные характеристики кристалла $ZrO_2-Y_2O_3-Ho_2O_3$

М.А.Борик, Е.Е.Ломонова, А.А.Ляпин, А.В.Кулебякин,  
П.А.Рябочкина, С.Н.Ушаков, А.Н.Чабушкин

*Для кристалла  $ZrO_2-13.6$  мол.%  $Y_2O_3-0.4$  мол.%  $Ho_2O_3$  (с использованием спектров поглощения и люминесценции, обусловленных переходами  $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$ ,  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$  при  $T = 300$  К) рассчитаны спектральные зависимости сечения усиления лазерного перехода  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$  при различных значениях параметра относительной инверсной населенности и впервые получена лазерная генерация на этом переходе в условиях накачки ( $\lambda_p = 1.905$  мкм)  $YLiF_4$ : Tm-лазером. Длина волны генерации лазера на кристалле  $ZrO_2-13.6$  мол.%  $Y_2O_3-0.4$  мол.%  $Ho_2O_3$  составила 2.17 мкм.*

**Ключевые слова:** спектр поглощения, спектр люминесценции, лазерная генерация, ионы  $Ho^{3+}$ , кристаллы  $ZrO_2-Y_2O_3-Ho_2O_3$ .

Разупорядоченность кристаллической структуры кристаллов диоксида циркония, стабилизированного иттрием, обуславливает значительное неоднородное уширение линий в спектрах поглощения и люминесценции редкоземельных ионов-активаторов. Это позволяет рассматривать их в качестве активных лазерных сред с перестраиваемой частотой генерации и перспективного материала для разработки на их основе лазеров с пико- и фемто-секундными длительностями импульсов излучения генерации.

Результаты исследования спектрально-люминесцентных характеристик кристаллов стабилизированного диоксида циркония, активированных ионами  $Nd^{3+}$ ,  $Yb^{3+}$ , приводятся в работах [1, 2]. Авторы [3, 4] сообщают о результатах генерационных экспериментов на кристаллах  $ZrO_2-Y_2O_3-Yb_2O_3$ . В работе [5] нами представлены результаты генерационного эксперимента по получению двухмикронной лазерной генерации на переходе  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  в кристаллах  $ZrO_2-Y_2O_3-Tm_2O_3$  в условиях полупроводниковой накачки на уровень  $^3H_4$  ионов  $Tm^{3+}$ .

Лазеры, генерирующие излучение в двухмикронной области спектра, представляют интерес для медицинских применений и лидаров. Лазерная генерация в этой спектральной области получена на переходах  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  и  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$  в различных оксидных и фторидных кристаллах. Характеристики двухмикронных лазеров на основе оксидных и фторидных материалов, активированных ионами  $Tm^{3+}$  и  $Ho^{3+}$ , представлены в обзоре [6]. Результаты работ по исследованию спектрально-люминесцентных характеристик различных кристал-

лов и стекол, активированных ионами  $Ho^{3+}$  [6–8], свидетельствует о том, что самая длинноволновая генерация на переходе  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$  получена в настоящее время при диодной накачке на кристаллах  $Y_3Al_5O_{12}:Ho$  [6] и  $Lu_2O_3:Ho$  (2.12 мкм), а также при накачке этих же кристаллов излучением тулиевого волоконного лазера [8]. В работах [9–12] сообщается о разработке двухмикронных волоконных лазеров, наибольшая длина волны генерации излучения которых равна 2.15 мкм.

В настоящей работе с использованием спектральных зависимостей сечений поглощения и люминесценции переходов  $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$ ,  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$  для кристаллов состава  $ZrO_2-13.6$  мол.%  $Y_2O_3-0.4$  мол.%  $Ho_2O_3$  получена спектральная зависимость усиления лазерного перехода  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$ , а также описаны результаты генерационного эксперимента на этих кристаллах при накачке  $YLiF_4$ : Tm-лазером.

Кристаллы стабилизированного оксидом иттрия диоксида циркония, активированного ионами  $Tm^{3+}$ , выращены на установке «Кристалл-407». Синтез кристаллов состава  $ZrO_2-13.6$  мол.%  $Y_2O_3-0.4$  мол.%  $Ho_2O_3$  проводился в холодном контейнере диаметром 130 мм при скорости роста 10 мм/ч. Выращенные кристаллы имели 40–50 мм в длину и 10–20 мм в поперечном сечении. Из этих кристаллов были вырезаны плоскопараллельные пластинки для проведения спектрально-люминесцентных исследований и активные элементы в виде прямоугольных параллелепипедов для проведения генерационного эксперимента. Концентрация ионов  $Ho^{3+}$  в кристаллах составила  $2.1 \times 10^{20}$  см<sup>-3</sup>.

Спектры поглощения ионов  $Ho^{3+}$  регистрировались спектрофотометром Lambda 950 (Perkin Elmer). Спектры люминесценции с уровня  $^5I_7$  ионов  $Ho^{3+}$  регистрировались с помощью автоматизированной установки на базе монохроматора МДР-23 при возбуждении на уровень  $^5S_2$  ионов  $Ho^{3+}$  излучением (532 нм) второй гармоники лазера на кристаллах  $YVO_4:Nd$ . В качестве приёмника излучения использовалось фотосопротивление на основе PbS.

Важной характеристикой активной лазерной среды является спектральная зависимость сечения усиления лазерного перехода редкоземельного иона-активатора  $\sigma_g$ .

М.А.Борик, Е.Е.Ломонова, А.В.Кулебякин, С.Н.Ушаков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38  
А.А.Ляпин, П.А.Рябочкина, А.Н.Чабушкин. Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарева, Россия, 430005 Саранск, ул. Большевикская, 68; e-mail: andrei\_lyapin@mail.ru, ryabochkina@freemail.mrsu.ru

Она позволяет оценить область длин волн, в которой возможно получение лазерной генерации на соответствующем переходе иона, и определяется по формуле

$$\sigma_g = p\sigma_{em} - (1 - p)\sigma_{ab}, \tag{1}$$

где  $\sigma_{em}$  – сечение люминесценции на выбранной длине волны;  $\sigma_{ab}$  – сечение поглощения на той же длине волны;  $p = N_{ex}/(N_{ex} + N_f)$  – параметр относительной инверсной населенности;  $N_{ex}$  – населенность верхнего лазерного уровня  $^5I_7$  ионов  $Ho^{3+}$ ;  $N_{ex} + N_f$  – полное число частиц (концентрация ионов активатора).

Спектральная зависимость сечения поглощения для перехода  $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$  ионов  $Ho^{3+}$  находилась по формуле

$$\sigma_{ab} = k(\lambda)/N, \tag{2}$$

где  $k(\lambda)$  – коэффициент поглощения для данной длины волны  $\lambda$ ;  $N$  – концентрация ионов  $Ho^{3+}$ .

Спектральная зависимость сечения люминесценции лазерного перехода  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$  определялась по формуле Фухтбауэра–Ладенбурга

$$\sigma_{em}(\lambda) = \frac{\lambda^5}{8\pi c n^2 \tau_{rad}} \frac{I(\lambda)}{\int \lambda I(\lambda) d\lambda}. \tag{3}$$

Здесь  $\tau_{rad}$  – излучательное время жизни уровня  $^5I_7$  ионов  $Ho^{3+}$ ;  $n$  – показатель преломления среды;  $I$  – интенсивность люминесценции в относительных единицах. Считая, что вероятность безызлучательной релаксации с уровня  $^5I_7$  ионов  $Ho^{3+}$  мала, мы использовали значение  $\tau_{rad} = 1/A = 14.7$  мс, где

$$A = \frac{8\pi n^2 c}{N\lambda^4} \frac{2J^{(1)} + 1}{2J + 1} \int k(\lambda) d\lambda \tag{4}$$

– вероятность излучательного перехода с уровня;  $J^{(1)}$  и  $J$  – полные моменты количества движения  $4f$ -электронов в основном и возбужденном состояниях, между которыми осуществлялся переход.

На рис.1 представлены сечения поглощения и люминесценции для переходов  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$  в кристаллах  $ZrO_2-13.6$  мол.%  $Y_2O_3-0.4$  мол.%  $Ho_2O_3$  при  $T = 300$  К, а на рис.2 – полученная по формуле (1) спектральная зависимость сечения усиления лазерного перехода  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ .

Для проведения генерационных экспериментов был собран стенд, оптическая схема которого приведена на

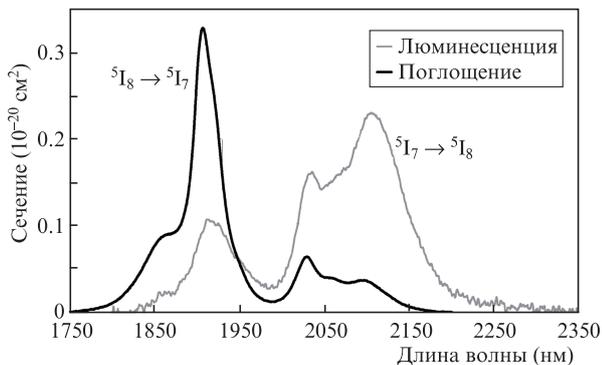


Рис.1. Спектральные зависимости сечения поглощения и люминесценции для перехода  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$  в кристаллах  $ZrO_2-13.6$  мол.%  $Y_2O_3-0.4$  мол.%  $Ho_2O_3$  при  $T = 300$  К.

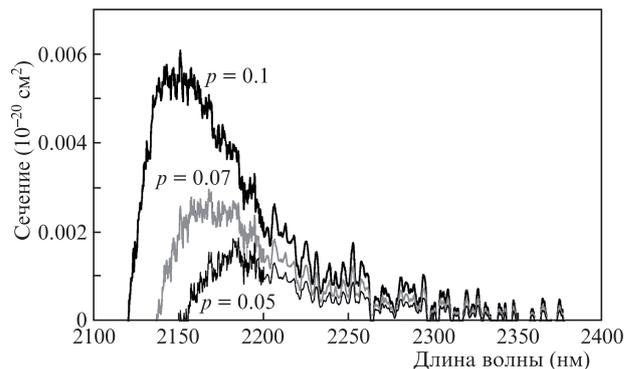


Рис.2. Спектральные зависимости сечения усиления лазерного перехода  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$  в кристаллах  $ZrO_2-13.6$  мол.%  $Y_2O_3-0.4$  мол.%  $Ho_2O_3$  при различных параметрах инверсной населенности  $p$ .

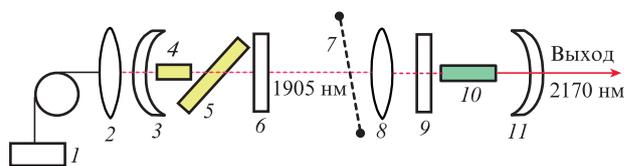


Рис.3. Оптическая схема генерационного эксперимента с лазером на кристалле  $ZrO_2-13.6$  мол.%  $Y_2O_3-0.4$  мол.%  $Ho_2O_3$ .

рис.3. Схема включает в себя лазер накачки на кристалле  $YLiF_4:Tm$ , активный элемент 4 которого имел форму прямоугольного параллелепипеда с размерами  $3 \times 3 \times 10$  мм и просветляющими покрытиями на торцах на длине волны генерации 1.9 мкм. Медная оправка активного элемента термостатировалась при  $T \approx 18^\circ C$ . Резонатор лазера накачки образован сферическим глухим зеркалом 3 ( $R = 100$  мм) и плоским выходным зеркалом 6 с коэффициентом пропускания 4%. Для согласования спектра излучения лазера накачки со спектром поглощения ионов  $Ho^{3+}$  в резонатор лазера был установлен фильтр Лио 5, который позволял перестраивать длину волны генерации в диапазоне 1900–1930 нм. Лазер на кристалле  $YLiF_4:Tm$  накачивался излучением линейки лазерных диодов 1 с волоконным выходом (диаметр волокна 400 мкм). Область накачки диаметром 600 мкм формировалась с помощью линз 2.

Активный элемент 10 из кристалла  $ZrO_2-13.6$  мол.%  $Y_2O_3-0.4$  мол.%  $Ho_2O_3$  имел форму параллелепипеда с размерами  $3 \times 3 \times 20$  мм и просветляющими покрытиями на торцах на длине волны генерации ( $\lambda_{gen} \sim 2.15$  мкм). Излучение лазера накачки фокусировалось в активном элементе линзой 8, диаметр перетяжки пучка составлял 300 мкм. Для снижения тепловой нагрузки активного элемента применялся обтюратор 7, формирующий импульсы накачки длительностью 30 мс с частотой следования  $\sim 3$  Гц. В эксперименте использовался полуконфокальный резонатор, образованный плоским зеркалом 9 (коэффициент пропускания в области длины волны накачки не менее 60%, коэффициент отражения на  $\lambda_{gen}$  более 99%) и сферическим выходным зеркалом 11 ( $R = 100$  мм) с коэффициентом пропускания на  $\lambda_{gen}$  менее 1%.

Лазерная генерация на переходе  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  иона  $Ho^{3+}$  в кристалле  $ZrO_2-13.6$  мол.%  $Y_2O_3-0.4$  мол.%  $Ho_2O_3$  была получена на длине волны  $\lambda_{gen} = 2,17$  нм. Порог генерации составил 380 мВт по поглощенной мощности накачки, спектр генерации приведен на рис.4.

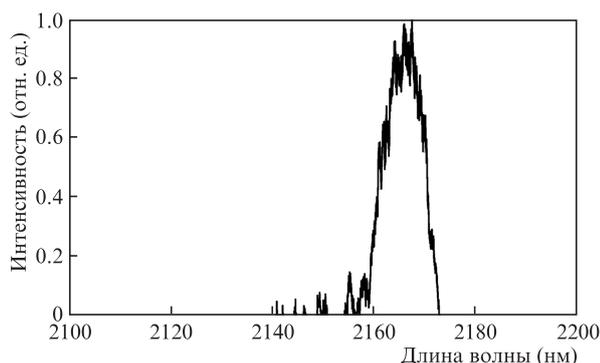


Рис.4. Спектр лазерной генерации на переходе  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в кристаллах  $\text{ZrO}_2-13.6 \text{ мол.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3-0.4 \text{ мол.}\% \text{ Ho}_2\text{O}_3$ .

Осциллограммы импульса лазерной генерации и импульса люминесценции, полученные с помощью цифрового осциллографа GDS 720С, представлены на рис.5.

Таким образом, в настоящей работе получены спектральные зависимости сечений поглощения и люминесценции для переходов  $^5I_8 \leftrightarrow ^5I_7$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в кристаллах  $\text{ZrO}_2-13.6 \text{ мол.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3-0.4 \text{ мол.}\% \text{ Ho}_2\text{O}_3$ . Рассчитана спектральная зависимость сечения усиления для перехода  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ , по которой определена возможная область перестройки длины волны генерации, составляющая 2120–2200 нм. Впервые на этих кристаллах получена лазерная генерация (2,17 мкм) на переходе  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  при накачке  $\text{YLiF}_4:\text{Tm}$ -лазером. Следует отметить, что генерация лазера на кристалле  $\text{ZrO}_2-13.6 \text{ мол.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3-0.4 \text{ мол.}\% \text{ Ho}_2\text{O}_3$  является самой длинноволновой из всех известных для твердотельных лазеров на кристаллах, активированных ионами  $\text{Ho}^{3+}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 г. (госконтракт № 14.740.11.0071).

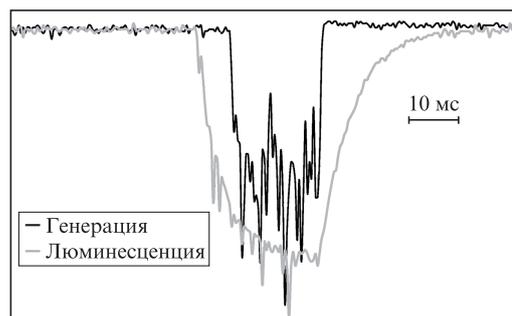


Рис.5. Осциллограммы импульсов люминесценции и лазерной генерации на кристалле  $\text{ZrO}_2-13.6 \text{ мол.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3-0.4 \text{ мол.}\% \text{ Ho}_2\text{O}_3$ .

1. Воронько Ю.К., Ломонова Е.Е., Вишнякова М.А., Попов А.В., Соболев А.А., Шукшин В.Е. *Неорганические материалы*, **40** (5), 585 (2004).
2. Воронько Ю.К., Ломонова Е.Е., Попов А.В., Соболев А.А., Ушаков С.Н. *Неорганические материалы*, **41** (8), 955 (2005).
3. Шукшин В.Е. *Труды ИОФАН*, **64**, 3 (2008).
4. Хромов М.Н. Автореф. канд. дис. (М., ИОФАН, 2009).
5. Рябочкина П.А., Борик М.А., Кулебякин А.В., Ломонова Е.Е., Малов А.В., Сомов Н.В., Ушаков С.Н., Чабушкин А.Н., Чупрунов Е.В. *Оптика и спектроскопия*, **112** (3), 513 (2012).
6. Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhberg P., in *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics* (Crotia: InTech., 2010).
7. Fomasiero L., Mix E., Peters V., Neumann E., Petermann K., Huber G. *Ceram. Intern.*, **26**, 589 (2000).
8. Koopmann P., Lamrini S., Scholle K., Schafer M., Fuhberg P., Huber G. *Opt. Mater. Express*, **1** (8), 1447 (2011).
9. Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **34**, 881 (2004).
10. Jackson S.D., Sabella A., Lancaster D. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13**, 567 (2007).
11. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Medvedkov O.I., Dvoyrin V.V., Pyrkov Yu.N., Tsvetkov V.B., Marakulin A.V., Minashina L.A. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 661 (2009).
12. Kurkov A.S., Dvoyrin V.V., Marakulin A.V. *Opt. Lett.*, **35**, 490 (2010).