## Генерационные характеристики кристаллов ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ho<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при накачке импульсным излучением Tm:LiYF<sub>4</sub>-лазера

## П.А.Рябочкина, С.А.Артемов, Н.Г.Захаров, Е.В.Салтыков, К.В.Воронцов, А.Н.Чабушкин, Е.Е.Ломонова

Получена импульсная двухмикронная лазерная генерация на переходе  ${}^{5}I_{7} \rightarrow {}^{5}I_{8}$  ионов  $Ho^{3+}$  кристаллов  $ZrO_{2} - Y_{2}O_{3} - Ho_{2}O_{3}$  при резонансной накачке на уровень  ${}^{5}I_{7}$  этих ионов излучением импульсного лазера на кристалле LiYF<sub>4</sub>: Tm. Эффективность преобразования излучения накачки, падающей на кристалл, в излучение лазерной генерации и дифференциальный КПД генерации при длительности импульсов 8 мс и частоте их следования 10 Гц составили 25% и 28% соответственно.

**Ключевые слова:** тулиевый лазер, двухмикронный спектральный диапазон, кристалл  $ZrO_2 - Y_2O_3 - Ho_2O_3$ .

## 1. Введение

Большой интерес к разработке двухмикронных твердотельных лазеров вызван их широким применением в медицинской технике, в лидарах, в приборах для мониторинга различных газов, а также в качестве источников для накачки лазеров, генерирующих излучение в области 4-5 мкм. В настоящее время известно значительное количество работ, в которых сообщается о двухмикронных лазерах на легированных ионами Tm<sup>3+</sup> и Ho<sup>3+</sup> кристаллах и керамике, генерирующих излучение в различных режимах [1–15].

В работах [13–15] нами сообщалось о получении двухмикронного лазерного излучения на переходе  ${}^{5}I_{7} \rightarrow {}^{5}I_{8}$  ионов Ho<sup>3+</sup> кристаллов ZrO<sub>2</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Ho<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при резонансной накачке на уровень  ${}^{5}I_{7}$  этих ионов непрерывным излучением LiYF<sub>4</sub>: Tm-лазера [13, 14] и тулиевого волоконного лазера [15].

Для кристаллов ZrO<sub>2</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (где R – ионы редкоземельных (P3) металлов), как и для полуторных оксидов и керамики (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), легированных P3 ионами, величина расщепления кристаллическим полем мультиплетов этих ионов на штарковские подуровни превышает аналогичную величину в других оксидных материалах (например, в Y<sub>3</sub>A<sub>15</sub>O<sub>12</sub>) [14]. Так, область спектра люминесценции перехода <sup>5</sup>I<sub>7</sub> → <sup>3</sup>I<sub>8</sub> ионов Ho<sup>3+</sup> в кристаллах ZrO<sub>2</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Ho<sub>2</sub>O<sub>3</sub> соответствует интервалу 1800–2300 нм, что позволило получить на них самую длинноволновую лазерную генерацию среди кристаллических сред, легиро-

**П.А.Рябочкина, С.А.Артемов.** Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарёва, Россия, 430005 Саранск, ул. Большевистская, 68;

e-mail: ryabochkina@freemail.mrsu.ru

Поступила в редакцию 14 апреля 2020 г.

ванных ионами  $Ho^{3+}$ , и реализовать область перестройки длины волны генерации в интервале 2056–2168 нм [14]. В работе [15] при использовании непрерывного тулиевого волоконного лазера в качестве источника накачки была получена двухмикронная импульсная генерация на кристаллах  $ZrO_2-Y_2O_3-Ho_2O_3$  в режиме модулированной добротности с длительностью импульсов 140 и 310 нс при частотах их следования 1 и 10 кГц соответственно.

Следует отметить, что низкая теплопроводность кристаллов стабилизированного диоксида циркония ограничивает возможность их использования в качестве активных элементов твердотельных лазеров с высокой выходной мощностью излучения. Повышение мгновенной мощности лазерного излучения возможно за счёт использования импульсной накачки, позволяющей значительным образом снизить тепловую нагрузку на кристалл. Поэтому представляет интерес изучение генерационных характеристик кристаллов  $ZrO_2 - Y_2O_3 - Ho_2O_3$  при резонансной импульсной накачке на уровень <sup>5</sup>I<sub>7</sub> ионов Ho<sup>3+</sup> излучением импульсного твердотельного лазера на кристаллах LiYF<sub>4</sub>:Tm.

## 2. Результаты исследований

Для проведения исследований методом прямого высокочастотного нагрева в холодном тигле на установке «Кристалл 407» (диаметр тигля 130 мм, скорость его опускания 10 мм/ч) были выращены кристаллы  $ZrO_2-Y_2O_3$  (13.6 мол. %) –  $Ho_2O_3$  (0.4 мол. %), обозначаемые далее как Ho: YSZ. Для проведения генерационных экспериментов из этих кристаллов были вырезаны активные элементы в виде прямоугольных параллелепипедов размерами  $3 \times 3 \times 18$  мм.

Оптическая схема импульсного Ho: YSZ-лазера представлена на рис.1. Накачка вырезанного из кристалла Ho: YSZ активного элемента осуществлялась излучением импульсного Tm:LiYF<sub>4</sub>-лазера, накачиваемого, в свою очередь, импульсами излучения мощных линеек лазерных диодов. Длина волны Tm:LiYF<sub>4</sub>-лазера накачки  $\lambda_p$  равнялась 1910 нм, длительность его импульсов при проведении экспериментов варьировалась и составляла 2, 4, 6 и 8 мс при частоте следования 10 Гц. Выбор указанных дли-

Н.Г.Захаров, Е.В.Салтыков, К.В.Воронцов. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Россия, Нижегородская обл., 607188 Саров, просп. Мира, 37

А.Н.Чабушкин. ООО «МЦКТ», Россия, 143025, Московская обл., Одинцовский р-н, дер. Сколково, ул. Новая, 100

**Е.Е.Ломонова.** Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38



Рис.1. Оптическая схема лазера на кристаллах Ho: YSZ при накачке импульсным Tm: LiYF<sub>4</sub>-лазером.

тельностей определялся тем, что, поскольку определенное в [13] время жизни уровня  ${}^{5}I_{7}$  ионов Ho ${}^{3+}$  составляет 14.7 мс, представлялось интересным изучить энергетические характеристики импульсной генерации при длительностях импульса накачки, меньших или соизмеримых с этим временем. Максимальная длительность импульса накачки (8 мс) была выбрана из соображений предотвращения разрушения активного элемента LiYF<sub>4</sub>: Tm-лазера.

На рис.2 приведены зависимости сечений поглощения для перехода  ${}^{5}I_{8} \rightarrow {}^{5}I_{7}$  и вынужденного излучения для перехода  ${}^{5}I_{7} \rightarrow {}^{5}I_{8}$  ионов Но<sup>3+</sup> в кристаллах Но: YSZ, полученные из экспериментально зарегистрированных спектра поглощения и спектра люминесценции этих переходов и представленные нами ранее в работах [13, 14]. Из спектра поглощения данного кристалла (переход  ${}^{5}I_{8} \rightarrow {}^{5}I_{7}$  ионов Но<sup>3+</sup>) видно, что длина волны 1910 нм является оптимальной для процесса накачки.

Торцы активного элемента из кристалла Ho: YSZ не были просветлены, поэтому для предотвращения попадания отражённого излучения обратно в лазер накачки в ходе эксперимента активный элемент наклонялся на небольшой угол относительно направления излучения накачки. Для эффективного теплоотвода активный элемент заворачивался в индиевую фольгу и помещался в медную оправку, температура которой в процессе проведения эксперимента поддерживалась на уровне T = 13 °C. Излучение импульсного Tm: LiYF<sub>4</sub>-лазера накачки фокусировалось в активный элемент линзой с фокусным расстоянием f =300 мм. Диаметр перетяжки пучка накачки в активном элементе при этом составил d = 0.6 мм.

Резонатор лазера был образован плоским входным и сферическим выходным зеркалами. Входное плоское зеркало имело высокий коэффициент пропускания на длине волны накачки HT = 98% ( $\lambda_p$  = 1910 нм) и высокий коэффициент отражения на длине волны генерации HR = 99.9% ( $\lambda_g$  = 2105 нм). В качестве выходного использовалось сферическое зеркало с радиусом кривизны *r* = 300 мм. Пропускание выходного зеркала  $T_m$  на  $\lambda_g$  составило 10%,



Рис.2. Спектральные зависимости сечений поглощения перехода  ${}^{5}I_{8} \rightarrow {}^{5}I_{7}$  и вынужденного излучения перехода  ${}^{5}I_{7} \rightarrow {}^{5}I_{8}$  ионов Ho<sup>3+</sup> в кристаллах Ho: YSZ, *T* = 300 K [13, 14].



Рис.3. Спектр лазера на кристалле Но: YSZ.

коэффициент отражения R на  $\lambda_p$  был равен 90%, что обеспечивало двойной проход излучения накачки через активный элемент из кристалла Но:YSZ. При измерении характеристик Но:YSZ-лазера использовалось дихроичное зеркало с  $T_m = 98\%$  на  $\lambda_g$  и R = 99.9% на  $\lambda_p$  для «отсечки» излучения лазера накачки.

В ходе экспериментов была получена импульсная генерация на кристалле Ho: YSZ при накачке Tm: LiYF<sub>4</sub>-лазером с длительностями импульсов 2, 4, 6, 8 мс и частотой их следования 10 Гц. Длина волны генерации составила 2107 нм при ширине спектра по полувысоте  $\Delta \lambda = 10$  нм (рис.3).



Рис.4. Импульсы генерации Но: YSZ- и Tm: LiYF<sub>4</sub>-лазеров при длительности импульсов накачки 2 (*a*) и 8 мс (*б*) и частоте следования 10 Гц.

На рис.4 представлены импульсы генерации Но : YSZлазера и Tm : LiYF<sub>4</sub>-лазера накачки, зарегистрированные с помощью фотоприемника SIP-100-250M-TO39-NG (Vigo System). Видно, что излучение обоих лазеров имеет характерную пичковую структуру.

Измерение энергий импульсной генерации лазера на кристалле Ho: YSZ и Tm: LiYF<sub>4</sub>-лазера накачки осуществлялось с помощью пироэлектрического датчика PE50BB-DIF-C (Ophir). Зависимости энергии генерации Ho: YSZлазера от энергии Tm: LiYF<sub>4</sub>-лазера накачки при длительностях импульсов накачки  $\tau_p = 2$  и 8 мс показаны на рис.5.

Эффективность преобразования энергии излучения импульсов накачки, падающей на кристалл, в излучение импульсов лазерной генерации при их длительности 8 мс и частоте следования 10 Гц составила  $\eta_0 = 25\%$  при дифференциальном КПД генерации  $\eta_d = 28\%$ . Аналогичные значения при длительностях импульса 2 мс и той же частоте следования равнялись 16% и 22%. В экспериментах при длительностях импульсов накачки и генерации 4 и 6 мс был получен дифференциальный КПД генерации 24% и 25% соответственно. Увеличение эффективности Но: YSZ-лазера при увеличении длительности импульса накачки, на наш взгляд, обусловлено следующим. Во-первых, существует задержка начала импульса генерации относительно импульса накачки, в течение которой формируется инверсная населенность в активной среде. Во-вторых, средняя мощность в импульсе генерации выходит на максимум через определённый промежуток времени, зависящий от скорости накачки и времени жизни ионов Но<sup>3+</sup> на верхнем лазерном уровне. Таким образом, вклад части импульса генерации с меньшей средней мощностью в общую энергию импульса лазерного излучения оказывается большим для коротких импульсов, что и приводит



Рис.5. Зависимости энергии генерации Но: YSZ-лазера  $E_{\rm g}$  от энергии импульсного Tm: LiYF<sub>4</sub>-лазера накачки  $E_{\rm p}$  при длительностях импульсов 2 (*a*) и 8 мс ( $\delta$ ) и частоте следования 10 Гц.

к наблюдаемой зависимости. Отметим, что мы не рассматривали влияние термолинзы, поскольку при использованных параметрах лазера накачки оно не является существенным.

Необходимо отметить, что для исследованных диапазонов длительности и энергии импульсов накачки, а также при выбранной частоте следования импульсов, представленные энергетические зависимости были линейными, что свидетельствует о возможности увеличения как энергии, так и частоты следования импульсов генерации при увеличении соответствующих параметров лазера накачки. При энергиях накачки  $E_p = 0.28$  и 1.11 Дж и длительностях импульса  $\tau_p = 2$  и 8 мс (частота следования в обоих случаях 10 Гц) энергия генерации составила 0.05 и 0.26 Дж соответственно.

Итак, в настоящей работе исследован импульсный режим работы лазера на кристаллах состава  $ZrO_2-Y_2O_3$  (13.6 мол.%) –  $Ho_2O_3(0.4$  мол.%). При резонансной накачке на уровень  ${}^{5}I_7$  ионов  $Ho^{3+}$  импульсным Tm : LiYF<sub>4</sub>-лазером получена генерация на переходе  ${}^{5}I_7 \rightarrow {}^{5}I_8$  с длиной волны  $\lambda_g = 2107$  нм и длительностями импульсов 2,4,6 и 8 мс при частоте следования импульсов 10 Гц. Максимальная энергия генерации импульсов с длительностью 8 мс и частотой их следования 10 Гц составила 0.26 Дж при энергии накачки  $E_p = 1.11$  Дж. Эффективность преобразования излучения накачки, падающей на кристалл, в излучение генерации и дифференциальный КПД генерации при длительностях импульсов 8 мс и частоте их следования 10 Гц составили 25% и 28% соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-29-20039).

- 1. Walsh B.M. Laser Phys., 19, 855 (2009).
- Scholle K., in Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics (Croatia: INTECH, 2010, p. 471).
- Koopmann P., Lamrini S., Scholle K., Fuhrberg P., Petermann K., Huber G., in *Advances in Optical Materials, OSA Technical Digest* (Optical Society of America, 2011, paper ATuA5).
- Antipov O.L., Novikov A.A., Zakharov N.G., Zinoviev A.P. Opt. Mater. Express, 2, 183 (2012).
- Lagatsky A.A., Fusari F., Kurilchik S.V., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Kuleshov N.V., Pavlyuk A.A., Brown C.T.A., Sibbett W. *Appl. Phys. B*, 97 (2), 321 (2009).
- Guo W., Chen Y., Lin Y., Gong X., Luo Z., Huang Y. J. Phys. D: Appl. Phys., 41, 115409 (2008).
- Больщиков Ф.А., Жариков Е.В., Захаров Н.Г., Лис Д.А., Рябочкина П.А., Субботин К.А., Антипов О.Л. Квантовая электроника, 40, 101 (2010) [Quantum Electron., 40, 101 (2010)].
- Больщиков Ф.А., Жариков Е.В., Захаров Н.Г., Лис Д.А., Рябочкина П.А., Субботин К.А., Антипов О.Л. Квантовая электроника, 40, 847 (2010) [Quantum Electron., 40, 847 (2010)].
- Lyapin A.A., Fedorov P.P., Garibin E.A., Malov A.V., Osiko V.V., Ryabochkina P.A., Ushakov S.N. Opt. Mater., 35, 1859 (2013).
- Antipov O.L., Novikov A.A., Larin S., Obronov I. Opt. Lett., 41, 2298 (2016).
- Рябочкина П.А., Чабушкин А.Н., Копылов Ю.Л., Балашов В.В., Лопухин К.В. Квантовая электроника, 46, 597 (2016) [Quantum Electron., 46, 597 (2016)].
- Борик М.А., Ломонова Е.Е., Малов А.В., Кулебякин А.В., Рябочкина П.А., Ушаков С.Н., Усламина М.А., Чабушкин А.Н. *Квантовая электроника*, **42**, 580 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 580 (2012)].
- Борик М.А., Ломонова Е.Е., Ляпин А.А., Кулебякин А.В., Рябочкина П.А., Ушаков С.Н., Чабушкин А.Н. Квантовая электроника, 43, 838 (2013) [Quantum Electron., 43, 838 (2013)].
- Ryabochkina P.A., Chabushkin A.N., Lyapin A.A., Lomonova E.E., Zakharov N.G., Vorontsov K.V. Laser Phys. Lett., 14, 055807 (2017).
- Chabushkin A.N., Lyapin A.A., Ryabochkina P.A., Antipov S.A., Lomonova E.E. *Laser Phys.*, 28, 3 (2018).