

# Квазинепрерывная генерация лазера на кристалле $\text{Yb}^{3+}$ , $\text{Er}^{3+}$ : LSB с продольной накачкой излучением диодных лазеров

Ю.П.Рудницкий, Л.В.Шачкин, С.Т.Дурманов, Г.В.Смирнов

Получена генерация ( $\lambda = 1.56$  мкм) лазера на кристалле  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ :  $\text{LaSc}_3(\text{BO}_3)_4$  ( $\text{Yb}$ ,  $\text{Er}$ : LSB) в квазинепрерывном режиме с мощностью 1.1 Вт при продольной накачке активного элемента. Проведено сравнение эффективностей генерации  $\text{Yb}$ ,  $\text{Er}$ : LSB-лазера и эрбиевого лазера на фосфатном стекле при одинаковых условиях оптической накачки.

**Ключевые слова:** кристалл LSB, продольная накачка, термомеханические деформации, квазинепрерывная генерация.

## 1. Введение

Фосфатные стекла, активированные ионами эрбия  $\text{Er}^{3+}$  и иттербия  $\text{Yb}^{3+}$ , являются в настоящее время лучшим материалом для создания эрбиевых лазеров с длиной волны излучения  $\lambda \approx 1.5$  мкм. Главные и существенные недостатки данного стекла – его низкие теплопроводность и порог термомеханического разрушения. По этим причинам различные тепловые эффекты ограничивают среднюю мощность эрбиевых лазеров [1, 2]. Кристаллы, активированные ионами  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ , имеют более высокую теплопроводность по сравнению с фосфатным стеклом, но большинство из них значительно уступает последнему в эффективности генерации из-за гораздо большего времени жизни уровня  $^4I_{11/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$  и, как правило, меньшего сечения вынужденного излучения. Ввиду особой привлекательности лазеров с  $\lambda \approx 1.5$  мкм для целого ряда практических применений постоянно ведется активная работа как по улучшению оптических и термомеханических свойств стекла [3–6], так и по поиску новых кристаллов [7–15].

Кристаллом, претендующим на роль основного материала для активного элемента эрбиевого лазера с диодной накачкой, является лантан-скандиевый борат  $\text{LaSc}_3(\text{BO}_3)_4$  (LSB) [8], в котором время жизни уровня  $^4I_{11/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$  меньше, чем в фосфатных стеклах. Один из самых главных недостатков кристалла LSB – значительно меньшее по сравнению со стеклом время жизни верхнего лазерного уровня  $^4I_{13/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$  ( $\sim 700$  мкс), вследствие чего необходима гораздо большая скорость накачки. Несмотря на относительно невысокую теплопроводность ( $\sim 2.8$  Вт·м $^{-1}$ ·К $^{-1}$ ) и на порядок меньшее, чем у фосфатных стекол [13], время жизни уровня  $^4I_{13/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$ , на этом кристалле получена непрерывная генерация с мощностью  $\sim 150$  мВт [12], что на сегодняшний день уступает, насколько нам известно, только результа-

там работы [15], где сообщается о достижении непрерывной генерации излучения  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ :  $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ -лазера на  $\lambda = 1.55$  мкм с мощностью 250 мВт на основной поперечной  $\text{TEM}_{00}$ -моду. В работах [12, 15] источником накачки служили диодные лазеры мощностью  $\sim 1.5$  Вт с выводом излучения через оптическое волокно.

В настоящей работе проведено сравнение эффективностей  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ : LSB-лазера и эрбиевого лазера на фосфатном стекле в квазинепрерывном режиме при продольной накачке излучением линейки диодных лазеров мощностью до 30 Вт.

## 2. Эксперимент

Оптическая схема экспериментальной установки показана на рис.1. Источником накачки служила линейка диодных лазеров (ЛДЛ) фирмы LIMO (Дортмунд, Германия) с номинальной мощностью в непрерывном режиме 25 Вт на  $\lambda = 976$  нм. При проведении экспериментов она использовалась как квазинепрерывный источник излучения с длительностью импульса  $\tau_p$  до 5 мс и мощностью  $P_p$  до 30 Вт. Линейка диодных лазеров была установлена на термоэлектрическом элементе Пельтье, с

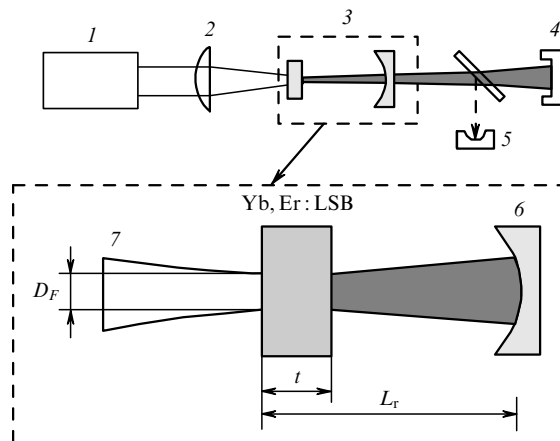


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – линейка диодных лазеров; 2 – линза; 3 – резонатор с активным элементом; 4 – измеритель энергии; 5 – германиевый фотодиод; 6 – зеркало резонатора; 7 – излучение накачки;  $t$  – толщина кристалла.

Ю.П.Рудницкий, Л.В.Шачкин, С.Т.Дурманов, Г.В.Смирнов. ФГУП «ГНЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, 142190 Троицк, Московская обл.; e-mail: smirgen@triniti.ru

Поступила в редакцию 11 марта 2005 г., после доработки – 13 октября 2005 г.

помощью которого мы могли менять ее температуру и, тем самым, длину волны излучения. Коллимированное излучение ЛДЛ фокусировалось сферической линзой на входную грань активного элемента (АЭ).

В экспериментах применялся АЭ из кристалла LSB с концентрациями  $[Yb] = 1.35 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$  и  $[Er] = 6.7 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , выращенного С.А.Кутовым. Активный элемент представлял собой плоскопараллельную пластину толщиной 2 мм, вырезанную перпендикулярно оси  $z$  кристалла. На одну грань АЭ было нанесено многослойное диэлектрическое покрытие с коэффициентом отражения  $R = 99.8\%$  на  $\lambda = 1.5 \text{ мкм}$  и коэффициентом пропускания  $T > 96\%$  на  $\lambda = 975 \text{ нм}$ . Эта грань использовалась в качестве зеркала резонатора и через нее же осуществлялась оптическая накачка АЭ. Для уменьшения потерь в резонаторе излучения с  $\lambda = 1.5 \text{ мкм}$  на другую грань АЭ было нанесено просветляющее покрытие. Область спектра с приемлемым для продольной накачки коэффициентом поглощения ( $k \approx 8.5 \text{ см}^{-1}$  для поляризации  $E_{\perp z}$  [13]) лежит в диапазоне 970–982 нм. Накачка АЭ осуществлялась излучением ЛДЛ с длиной волны в центре линии  $\lambda_0 = 973 \text{ нм}$ . Доля поглощенной активным элементом энергии излучения накачки  $\alpha$  была измерена и оказалась равной  $\sim 0.8$ .

Активный элемент из фосфатного стекла (изготовлен в ИРЭ РАН и предоставлен нам А.А.Изынеевым) с концентрациями  $[Yb] = 2.2 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$  и  $[Er] = 8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  представлял собой плоскопараллельную пластину с поперечным размером  $6 \times 6 \text{ мм}$  и толщиной 3 мм. На обе грани пластины были нанесены многослойные диэлектрические покрытия. Одна грань ( $6 \times 6 \text{ мм}$ ) с коэффициентом отражения  $R = 99.8\%$  на  $\lambda = 1.5 \text{ мкм}$  и коэффициентом пропускания  $T > 97\%$  на  $\lambda = 970 \text{ нм}$  служила зеркалом резонатора. Через нее же осуществлялась оптическая накачка АЭ. Для более эффективного использования излучения накачки на другую грань было нанесено покрытие с отражением 99% на  $\lambda = 970 \text{ нм}$ ; при этом пропускание на длине волны генерации превышало 97%. Накачка АЭ проводилась излучением ЛДЛ с  $\lambda_0 \approx 969 \text{ нм}$ , для чего температура линейки понижалась до  $6^\circ\text{C}$ .

Из-за того что расходимости излучения в направлениях быстрой и медленной осей ЛДЛ несколько различались, пятно излучения накачки на входной грани имело форму эллипса с отношением осей  $\sim 1:1.4$ . Диаметр фокального пятна излучения накачки  $D_F$ , приведенный ниже, соответствует меньшей из осей эллипса. Значения  $D_F$  определены по уровню интенсивности, равной половине максимальной. Поперечное сечение перетяжки сфокусированного излучения накачки на всей длине АЭ оставалось практически неизменным для всех используемых в эксперименте линз.

Для нахождения оптимальных для обоих лазеров режимов генерации такие параметры, как интенсивность излучения накачки  $I_p$ , длина резонатора  $L_r$ , радиус кривизны  $r$  и коэффициент отражения выходного зеркала  $R_{\text{out}}$ , варьировались в широких пределах. Все результаты были получены при постоянной частоте повторения импульсов  $f \approx 1 \text{ Гц}$ . Никаких специальных мер для охлаждения обоих АЭ не принималось.

### 3. Результаты

Оптическая накачка АЭ из кристалла LSB проводилась при длительностях импульса, значительно превышающих время жизни  $\tau_{\text{up}} \approx 700 \text{ мкс}$  верхнего лазерного уровня иона  $Er^{3+}$  [13]. Вследствие относительно малого времени  $\tau_{\text{up}}$  и небольшого сечения вынужденного излучения пороговая интенсивность накачки  $I_{\text{th}}$  была больше  $10 \text{ кВт/см}^2$ . Самая высокая эффективность генерации наблюдалась для резонатора с коэффициентом отражения плоского зеркала  $R_{\text{out}} = 97.2\%$ , наибольшим для всех зеркал, имевшихся в наличии. Увеличение прозрачности выходного зеркала с 2.8% до 5% приводило не только к росту  $I_{\text{th}}$  почти в два раза, но и к резкому уменьшению (примерно на порядок) мощности лазерного излучения. Оптимальная интенсивность накачки  $I_p$ , соответствующая наибольшей выходной мощности лазера, оказалась настолько высокой ( $I_p \approx 25 \text{ кВт/см}^2$  для  $D_F \approx 300 \text{ мкм}$ ), что термодформации АЭ за время действия импульса накачки  $\tau_p$  существенно влияли на характер генерации.

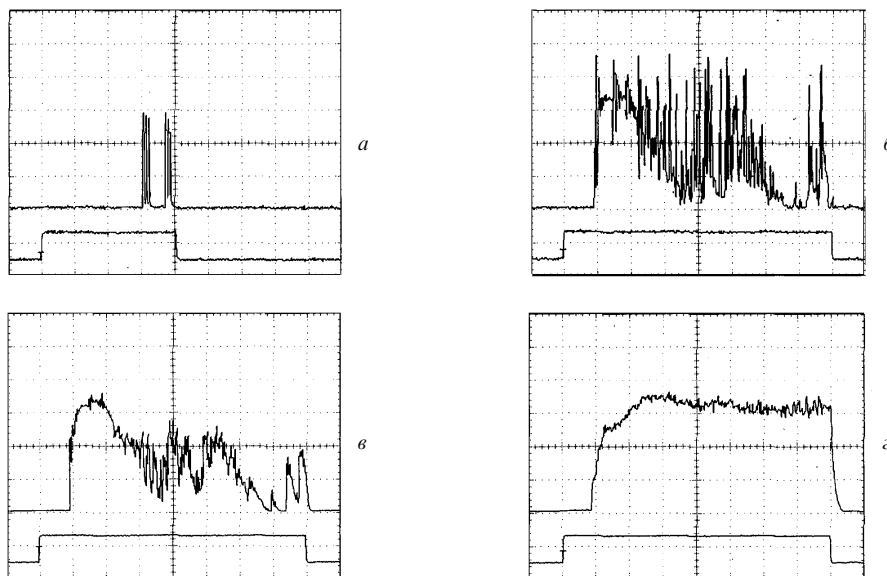


Рис.2. Осциллограммы импульсов излучения Yb, Er: LSB-лазера (верхние лучи) и накачки (нижние лучи) при  $L_r = 30 \text{ мм}$  (один импульс) (а),  $13 \text{ мм}$  (один импульс) (б),  $13 \text{ мм}$  (усреднение по 16 импульсам) (в) и  $4 \text{ мм}$  (усреднение по 16 импульсам) (з),  $P_p = 30.7 \text{ Вт}$ ,  $r = \infty$ ,  $R_{\text{out}} = 97.2\%$ .

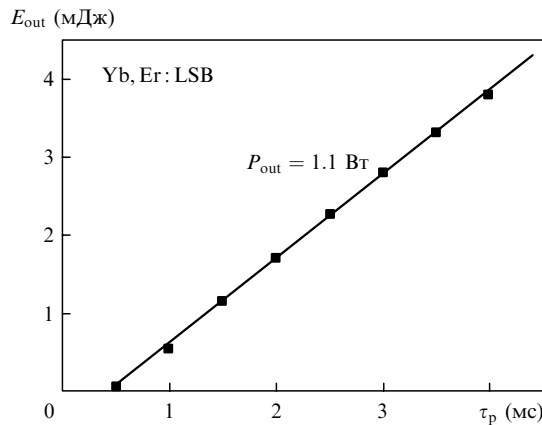


Рис.3. Зависимость выходной энергии лазерного излучения  $E_{out}$  от длительности импульса накачки  $\tau_p$  при максимальной мощности  $P_p = 30.7$  Вт,  $r = \infty$ ,  $R_{out} = 97.2\%$  и  $L_r = 4$  мм.

На рис.2 приведены осциллограммы импульсов излучения для резонаторов, различающихся только длиной. Видно, что относительно стабильную квазинепрерывную генерацию в течение всего импульса ( $\tau_p = 4$  мс) удалось получить только для резонатора с самой малой длиной. На рис.3 показана зависимость  $E_{out}$  от  $\tau_p$  при

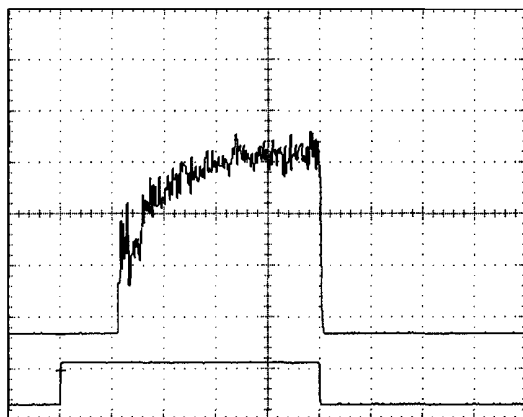


Рис.4. Осциллограммы импульсов излучения Yb,Er-лазера на фосфатном стекле (верхний луч) и накачки (нижний луч) при  $P_p = 30.7$  Вт,  $r = \infty$ ,  $R_{out} = 95\%$  и  $L_r = 30$  мм (усреднение по 16 импульсам).

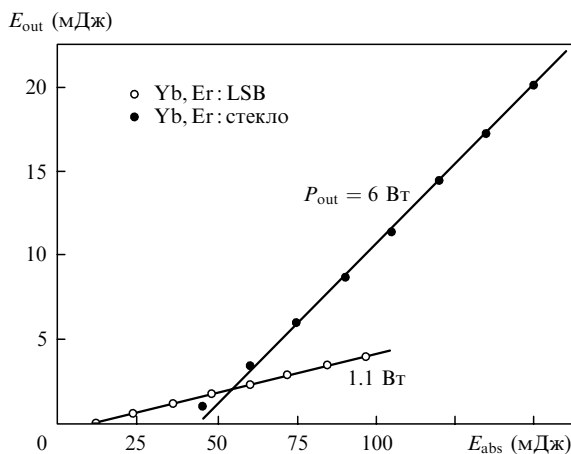


Рис.5. Зависимости выходной энергии  $E_{out}$  от энергии  $E_{abs}$ , поглощенной АЭ, для Yb,Er:LSB-лазера и Yb,Er-лазера на фосфатном стекле при мощности накачки  $P_p = 30.7$  Вт.

максимальной мощности  $P_p = 30.7$  Вт. Как следует из рис.3, мощность лазерного излучения в квазинепрерывном режиме  $P_{out} = 1.1$  Вт. Максимальный оптический КПД  $\eta_{op} = E_{out}/(P_p \alpha \tau_p)$ , полученный в этих условиях, составляет  $\sim 4.0\%$ , а максимальный дифференциальный КПД  $\eta \approx 4.6\%$ .

Наилучшие результаты для АЭ из фосфатного стекла были достигнуты при  $D_F \approx 500$  мкм. На рис.4 показаны форма импульса излучения и форма импульса тока источника питания ЛДЛ для этого случая. Зависимость выходной энергии  $E_{out}$  от энергии  $E_{abs}$ , поглощенной АЭ, при мощности накачки  $P_p = 30.7$  Вт показана на рис.5. В данном случае максимальный оптический КПД  $\eta_{op} \approx 13.3\%$ , максимальный дифференциальный КПД  $\eta \approx 20\%$ , а мощность лазерного излучения в квазинепрерывном режиме составляет  $\sim 6$  Вт. Для сравнения на рис.5 дана также зависимость  $E_{out}$  от  $E_{abs}$  для Yb,Er:LSB-лазера, полученная при том же значении  $P_p$ .

#### 4. Заключение

Сравнение эффективностей лазеров с продольной накачкой на кристалле лантан-скандиевого бората и фосфатном стекле было проведено при параметрах оптической накачки (мощность излучения  $P_p \approx 30$  Вт, длительность импульса  $\tau_p = 1 - 5$  мс), близких к требуемым для реализации режима модулированной добротности резонатора с энергией излучения  $E_{md} \geq 1$  мДж [16]. Несмотря на то что температуропроводность кристалла LSB  $\chi \approx 0.013$  см<sup>2</sup>/с почти в четыре раза больше температуропроводности фосфатного стекла и характерная длина переноса тепла  $L_h \approx 2(\chi \tau_p)^{1/2}$  за время  $\tau_p = 4$  мс порядка радиуса фокального пятна накачки, выделение тепла в АЭ из LSB в течение импульса накачки приводит к заметно большей деформации поверхности АЭ. Используя предложенную в [17] методику измерения фокусного расстояния термической линзы в твердотельных лазерах с малой длиной активной среды, основанную на наблюдении срыва генерации, можно оценить для наших условий кривизну поверхности АЭ, являющейся зеркалом резонатора. Оценки показывают, что радиус кривизны  $r_c$  поверхности АЭ из кристалла LSB к концу импульса накачки мощностью 30 Вт и длительностью 2 мс ( $r_c \approx 15$  мм) более чем на порядок меньше аналогичной величины для АЭ из фосфатного стекла.

Как показано выше, КПД генерации в квазинепрерывном режиме LSB-лазера оказался в несколько раз меньше, чем лазера на фосфатном стекле. Этот факт и то, что небольшое увеличение потерь излучения на выходном зеркале резонатора LSB-лазера приводило к уменьшению мощности лазерного излучения на порядок, позволяют сделать вывод о том, что и эффективность Yb,Er:LSB-лазера с продольной накачкой активной среды и модуляцией добротности резонатора будет крайне низкой.

Авторы выражают благодарность А.А.Изынцеву и П.И.Садовскому за предоставленные АЭ из фосфатного стекла.

1. Laporta P., Taccheo S., Longhi S., Svelto O., Svelto C. *Opt. Mater.*, **11**, 269 (1999).
2. Cai Z.P., Chardon A., Xu H., Feron P., Stephan G.M. *Opt. Commun.*, **203**, 301 (2002).
3. Jiang S., Myers J., Wu R., Gregg M., Bishop M., Phonehouse D., Myers M., Hamlin S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2379**, 17 (1995).

4. Denker B.I., Galagan B.I., Osiko V.V., Sverchkov S.E. *Laser Phys.*, **12**, 104 (2002).
5. Алексеев Н.Е., Бышевская-Конопко Л.О., Воробьев И.Л., Изынеев А.А., Садовский П.И. *Квантовая электроника*, **33**, 1062 (2003).
6. Wu R., Myers J.D., Myers M.J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4968**, 11 (2003).
7. Денисов А.Л., Жариков Е.В., Загуменный А.И., Калитин С.П., Смирнов В.А., Талыбов А.И., Щербаков И.А. *ЖПЭС*, **49**, 430 (1988).
8. Кутовой С.А., Лаптев В.В., Мацнев С.Ю. *Квантовая электроника*, **18**, 149 (1991).
9. Schweizer T., Jensen T., Neumann F., Huber G. *Opt. Commun.*, **118**, 557 (1995).
10. Simondi-Tesseire D., Viana B., Lejus A., Benitez J., Vivien D., Borel C., Templier R., Wyon C. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 2004 (1996).
11. Capobianco J.A., Kabro P., Ermeneux F.S., Moncorge R., Bettinelli M., Cavalli E. *Chem. Phys.*, **214**, 329 (1997).
12. Dienes A., Neumann F., Huber G., Kuzmin O. *Techn. Dig. on CLEO'98* (USA, Washington: OSA, 1998, Vol. 7, paper CWM-5).
13. Lebedev V.A., Pisarenko V.F., Selina N.V., Perfilin A.A., Brik M.G. *Opt. Mater.*, **14**, 121 (2000).
14. Voroshilov I.V., Lebedev V.A., Ignatiev B.V., Gavrilenko A.N., Isaev V.A., Pisarenko V.F. *J. Phys.: Condens. Mater.*, **12**, L287 (2000).
15. Burns P., Dawes J.M., Wang P., Piper J.A., Zhang H., Zhu L., Meng X. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4968**, 79 (2003).
16. Boutchenkov V., Kuchma I., Levoshkin A., Mak A., Petrov A., Hollemann G. *Opt. Commun.*, **177**, 383 (2000).
17. Ведяшкин Н.В., Державин С.И., Кузьминов В.В., Машковский Д.А. *Квантовая электроника*, **33**, 367 (2003).