

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

Ключевые слова: кристалл LSB, продольная накачка, термодеструкции, квазинепрерывная генерация.

1. Введение

Фосфатные стекла, активированные ионами эрбия Er^{3+} и иттербия 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 Er^{3+} и 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 $^4\text{I}_{11/2}$ иона 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 $^4\text{I}_{11/2}$ иона 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 $^4\text{I}_{13/2}$ иона Er^{3+} (~ 700 мкс), вследствие чего необходима гораздо большая скорость накачки. Несмотря на относительно невысокую теплопроводность (~ 2.8 Вт·м $^{-1}$ ·К $^{-1}$) и на порядок меньшее, чем у фосфатных стекол [13], время жизни уровня $^4\text{I}_{13/2}$ иона Er^{3+} , на этом кристалле получена непрерывная генерация с мощностью ~ 150 мВт [12], что на сегодняшний день уступает, насколько нам известно, только результа-

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

В настоящей работе проведено сравнение эффективностей Yb^{3+} , 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 τ_p до 5 мс и мощностью P_p до 30 Вт. Линейка диодных лазеров была установлена на термоэлектрическом элементе Пельтье, с

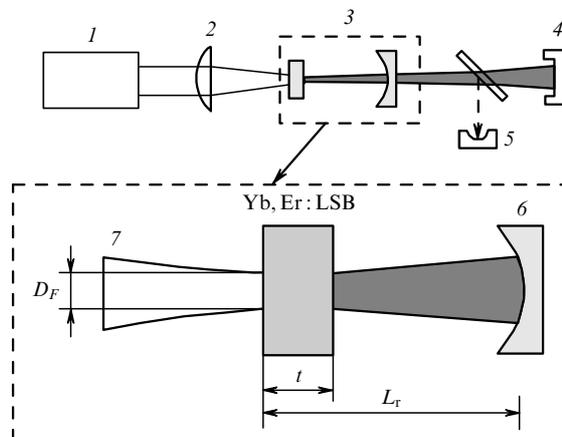


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – линейка диодных лазеров; 2 – линза; 3 – резонатор с активным элементом; 4 – измеритель энергии; 5 – германиевый фотодиод; 6 – зеркало резонатора; 7 – излучение накачки; t – толщина кристалла.

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 α была измерена и оказалась равной ~ 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°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_{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 τ_{up} и небольшого сечения вынужденного излучения пороговая интенсивность накачки I_{th} была больше 10 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_{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 τ_p существенно влияли на характер генерации.

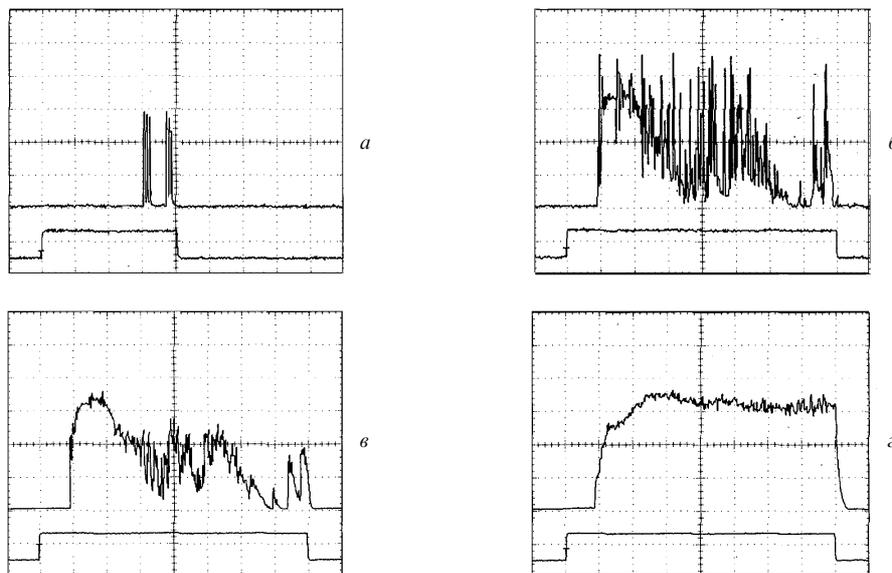


Рис.2. Осциллограммы импульсов излучения Yb, Er : LSB-лазера (верхние лучи) и накачки (нижние лучи) при $L_r = 30 \text{ мм}$ (один импульс) (а), 13 мм (один импульс) (б), 13 мм (усреднение по 16 импульсам) (в) и 4 мм (усреднение по 16 импульсам) (з), $P_p = 30.7 \text{ Вт}$, $r = \infty$, $R_{\text{out}}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

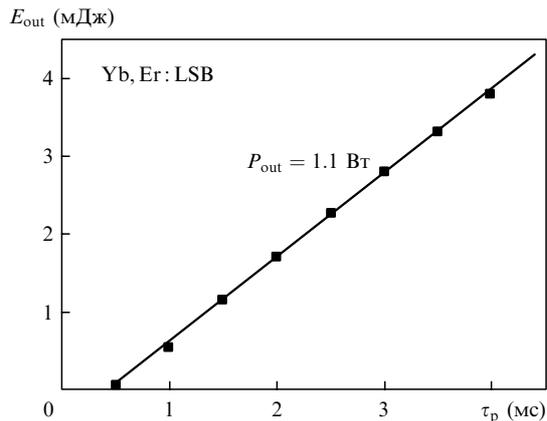


Рис.3. Зависимость выходной энергии лазерного излучения E_{out} от длительности импульса накачки τ_p при максимальной мощности $P_p = 30.7$ Вт, $r = \infty$, $R_{out} = 97.2\%$ и $L_r = 4$ мм.

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 τ_p при

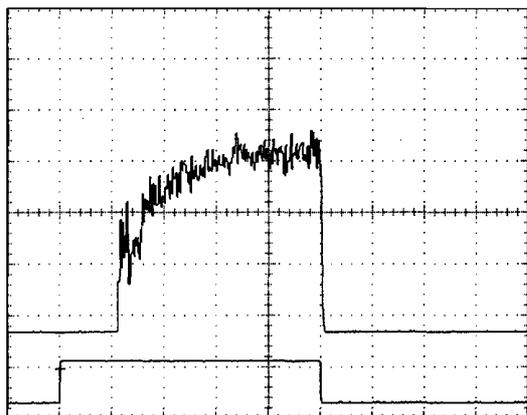


Рис.4. Осциллограммы импульсов излучения Yb, Er -лазера на фосфатном стекле (верхний луч) и накачки (нижний луч) при $P_p = 30.7$ Вт, $r = \infty$, $R_{out} = 95\%$ и $L_r = 30$ мм (усреднение по 16 импульсам).

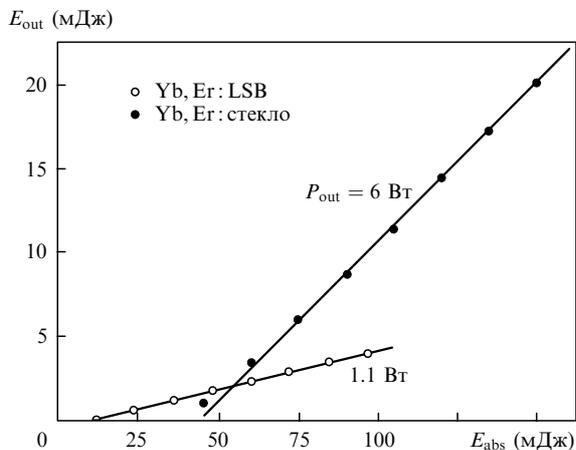


Рис.5. Зависимости выходной энергии E_{out} от энергии E_{abs} , поглощенной АЭ, для Yb, Er : LSB-лазера и Yb, Er -лазера на фосфатном стекле при мощности накачки $P_p = 30.7$ Вт.

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 ~ 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 $\chi \approx 0.013$ см²/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).