

СЛЭБ-ЛАЗЕР НА ЭРБИЕВОМ СТЕКЛЕ С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

© 2008 г. Г. И. Рябцев*, доктор физ.-мат. наук; М. В. Богданович*; А. И. Енжиевский*; Л. Л. Тепляшин*, канд. физ.-мат. наук; А. П. Клищенко**, доктор физ.-мат. наук; А. В. Пожидаев**; М. А. Щемелев**, А. Г. Рябцев**; А. С. Красковский***; С. Н. Титовец***; К. В. Юмашев****, доктор физ.-мат. наук; А. М. Маляревич****, канд. физ.-мат. наук; О. С. Дымшиц****, канд. хим. наук; А. А. Жилин****, канд. хим. наук

* Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Белоруссии, Минск, Белоруссия

** Белорусский государственный университет, Минск, Белоруссия

*** ОАО “Пеленг”, Минск, Белоруссия

**** НИИ оптических материалов и технологий Белорусского национального технического университета, Минск, Белоруссия

***** Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНЦ “ГОИ им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: ryabtsev@dragon.bas-net.by

Разработан и исследован слэб-лазер на основе боросиликофосфатного стекла, легированного эрбием и иттербием, с поперечной диодной накачкой. В режиме пассивной модуляции добротности с использованием затвора на основе стеклокристаллического материала с наноразмерной шпинелью, активированного ионами двухвалентного кобальта, энергия выходного излучения составила 1,3 мДж при длительности импульса 19 нс. При активной модуляции добротности энергия разработанного лазера составила 2,3 мДж. Проведена оценка внутренних оптических потерь, определены параметры пассивного затвора.

Коды OCIS: 140.0140, 140.3500, 140.3580.

Поступила в редакцию 31.03.2008.

Введение

Лазеры на эрбиевом стекле – перспективные источники условно безопасного для органов зрения излучения (1,5–1,6 мкм) [1, 2]. В настоящее время большое внимание уделяется проблеме повышения выходной энергии излучения E_{out} таких излучателей. Один из способов достижения высоких значений E_{out} заключается в использовании многопроходных активных элементов (АЭ) со слэб-геометрией. Зигзагообразный оптический путь позволяет свести к минимуму влияние тепловой линзы и индуцированного двулучепреломления на характеристики активных элементов лазеров. Слэб-конфигурация АЭ широко применяется при создании высокоэффективных твердотельных лазеров на основе Nd, Yb и Tm-содержащих сред [3–5].

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию параметров твердотельного слэб-лазера (ТСЛ) на эрбий-иттербиевом стекле с мощной поперечной диодной накачкой, излучающего на длине волны примерно 1,54 мкм. Изучена работа лазера в режимах активной и пассивной модуляций

добротности, оценены внутренние оптические потери, определены параметры пассивного затвора на основе стеклокристаллического материала. Характеристики созданного образца ТСЛ сопоставлены с генерационными свойствами лазера на эрбий-иттербиевом стекле с цилиндрическим АЭ.

Эксперимент

Конструкция исследованного твердотельного слэб-лазера с поперечной диодной накачкой схематично представлена на рис. 1. АЭ изготавливался из боросиликофосфатного стекла, легированного ионами эрбия и иттербия (Er, Yb:БСФС). Концентрации эрбия и иттербия составляли 5×10^{19} ат/см³ и 4×10^{21} ат/см³ соответственно. Активный элемент формировался в виде усеченного параллелепипеда $1 \times 2 \times 9,9$ мм³ с углом скоса $\varphi \approx 27^\circ$. Геометрические параметры активного элемента выбирались таким образом, чтобы достигалось полное апертурное/объемное заполнение активной среды лазерным излучением при четырехкратном внутреннем отражении генерируемого пучка, выходящего в направ-

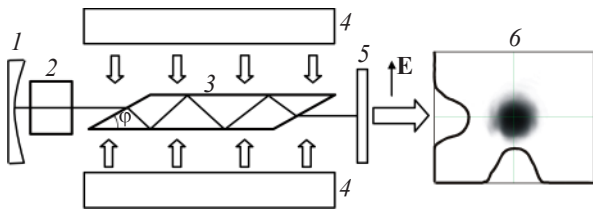


Рис. 1. Схема слэб-лазера с поперечной диодной накачкой. 1 – «глухое» сферическое зеркало $r = 500$ мм, 2 – оптический затвор (активный или пассивный), 3 – активный элемент, 4 – лазерные диодные линейки, 5 – выходное плоское зеркало с $R = 88\%$, 6 – поперечный профиль распределения интенсивности выходного пучка.

лении, параллельном граням полного внутреннего отражения АЭ. При этом угол скоса обеспечивал вход излучения в АЭ под углом, близким к углу Брюстера, что позволило не наносить на грани просветляющие покрытия. Расчетные значения потерь на входных гранях не превышали 2,5% за полный обход резонатора для излучения с направлением поляризации, перпендикулярным граням полного внутреннего отражения. Для другой поляризационной компоненты расчетные потери за полный обход составляли порядка 60%. Для сравнительного анализа характеристик ТСЛ в экспериментах использовался также АЭ в виде стержня диаметром 2 мм и длиной 10 мм из аналогичного Er, Yb:BCFS . На торцы стержня наносились покрытия, просветляющие на длине волн генерации.

Активные элементы возбуждались InGaAs/AlGaAs лазерными диодными линейками с шириной картины ближнего поля 5 мм (ОАО «НПП Инжект», Саратов, Россия). Мощность каждой линейки составляла 25 Вт при длительности импульса накачки 5 мс и частоте следования импульсов до 20 Гц. Диодные линейки располагались парами с двух сторон АЭ. В случае активного элемента со слэб-геометрией излучение накачки вводилось через грани полного внутреннего отражения АЭ.

Характеристики эрбиевого излучателя исследовались в режиме свободной генерации, а также в режиме пассивной/активной модуляции добротности. В качестве активного затвора использовался электрооптический модулятор на основе ниобата лития – LiNbO_3 . Пассивный затвор представлял собой стеклокристаллический материал, содержащий наноразмерные кристаллы шпинели и активированный ионами двухвалентного кобальта – Co:MAC . Материал изготавливался регулируемой кристаллизацией стекла, содержащего оксиды магния и алю-

миния в эквимольном соотношении и необходимую концентрацию оксида кобальта. Стекло синтезировалось при температуре 1560 °С, а затем отжигалось при 700 °С. В результате регулируемой кристаллизации исходного стекла в нем формировалась кристаллическая фаза – наноразмерная шпинель, активированная ионами двухвалентного кобальта. С целью получения требуемого количества кристаллов шпинели проводилась дополнительная кристаллизация стекла при 700–1000 °С. Размер кристаллов шпинели в приготовленном стеклокристаллическом материале Co:MAC составлял примерно 10 нм, что обеспечивало его прозрачность. Спектр пропускания пассивного затвора представлен на рис. 2. Полоса поглощения в области длин волн 1,1–1,7 мкм связана с переходом ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_1({}^4F)$ ионов кобальта Co^{2+} , занимающих тетраэдрически координированные позиции в структуре кристалла MgAl_2O_4 [6–8] (вставка на рис. 2). Начальное пропускание затвора составляло примерно 79%.

Время релаксации просветления пассивного затвора измерялось по методу «возбуждение-зондирование» при возбуждении импульсами излучения эрбиевого лазера (1,54 мкм) длительностью 70 нс. Плотность энергии возбуждения на поверхности Co:MAC была около 2 Дж/см². Зондирование осу-

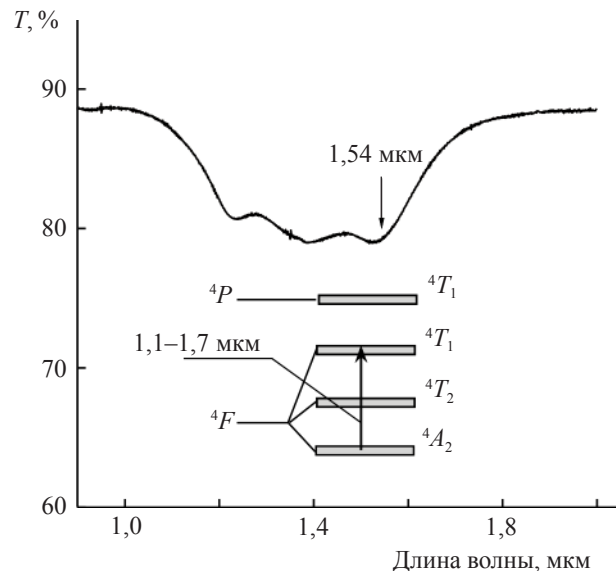


Рис. 2. Пропускание T стеклокристаллического материала Co:MAC толщиной 0,7 мм в зависимости от длины волны излучения в ближней ИК области спектра. На вставке приведена схема энергетических уровней иона $\text{Co}^{2+}(3d^7)$ в тетраэдрическом кристаллическом поле симметрии T_d и показан переход, соответствующий полосе поглощения в области 1,1–1,7 мкм.

ществлялось на длине волны 1,35 мкм длинным импульсом (приблизительно 500 мкс) излучения лазера на Nd:KGW с квазинепрерывной диодной накачкой.

Резонатор формировался с помощью полусферического “глухого” зеркала с радиусом кривизны $r = 500$ мм (или $r = 1000$ мм) и выходными плоскими зеркалами с различными коэффициентами отражения $R = 78, 88, 95$ и 98% на длине волны генерации (1540 нм). Резонатор лазера с модулированной добротностью формировался с помощью “глухого” сферического зеркала (радиус кривизны 500 мм) и плоского зеркала с $R = 88\%$. Длина резонатора составляла 60 мм.

Степень поляризации ТСЛ определялась из зависимости интенсивности излучения после его прохождения через призму Глана от угла поворота призмы. Энергия прошедшего через поляризатор излучения измерялась с помощью цифрового прибора *Ophir Laser Star*.

Параметр качества пучка излучения M^2 определялся по методике, основывающейся на гиперболической аппроксимации зависимости диаметров пучка от расстояния в области перетяжки, формируемой тонкой линзой. Фокусное расстояние линзы равнялось 130 мм. Диаметры исследуемых пучков находились методом моментов второго порядка с использованием поперечных профилей распределения интенсивности излучения, регистрируемых с помощью ИК камеры *ElectroPhysics 7290 Infrared Vidicon (Coherent)* с набором аттенюаторов, не искажающих профиль пучка [9].

Длительность и частота следования импульсов излучения измерялись с помощью скоростного германиевого фотодиода ФП-150П и цифрового осциллографа *Tektronix TDS 3052B*.

Результаты и обсуждение

В режиме свободной генерации энергия выходного светового импульса разработанного ТСЛ достигала значений 7 мДж (длительность импульса генерации 4 мс, поглощенная мощность излучения накачки порядка 30 Вт, частота следования импульсов 1 Гц). Внешний дифференциальный квантовый выход генерации составлял $\approx 8\text{--}15\%$. Как видно из рис. 1 (б), поперечный профиль распределения интенсивности излучения ТСЛ не является круговым. Поэтому параметр качества M^2 генерируемого пучка измерялся в двух взаимно ортогональных направлениях, соответствующих минимальному и максимальному размерам пучка. Значения M^2 оказались равными 2,8 (в направлении минимального размера) и 3,4 (в направлении максимального размера).

Генерируемое излучение ТСЛ имеет практически 100% линейную поляризацию, при этом электрический вектор световой волны \mathbf{E} располагается перпендикулярно граням полного внутреннего отражения. Такое положение вектора \mathbf{E} , по всей видимости, задается условиями поляризации пучка, испытывающего полное внутреннее отражение внутри АЭ, при которых оптические потери для данной ориентации \mathbf{E} минимальны.

В соответствии с методикой, изложенной в [10], для разработанного образца ТСЛ и лазера с цилиндрическим АЭ были оценены коэффициенты внутренних оптических потерь ρ . Вариация конфигураций резонаторов осуществлялась с помощью “глухих” зеркал $r = 500$ и 1000 мм и выходных зеркал с $R = 78, 88, 95$ и 98% . Длина резонатора была постоянной и равнялась 60 мм. Параметр ρ для активного элемента со слэб-конфигурацией оказался равным $0,03 \text{ см}^{-1}$, в случае цилиндрического АЭ значение ρ составило $0,07 \text{ см}^{-1}$. Такой разброс в значениях коэффициентов внутренних оптических потерь объясняется как неоднородностями стекла, из которого изготавливались активные элементы, так и различием размеров областей накачки в АЭ со слэб-геометрией и в цилиндрическом активном элементе.

Исследования кинетики наведенного изменения поглощения для стеклокристаллического материала позволили установить, что релаксация изменения поглощения в Co:MAC носит моноэкспоненциальный характер с постоянной времени 270 ± 45 нс, величина которого определяется временем жизни в возбужденном состоянии терма 4T_2 тетракоординированного иона Co^{2+} (см. вставку на рис. 2) [8]. Зависимость пропускания Co:MAC от плотности потока энергии падающих импульсов показана на рис. 3. Видно, что с ростом накачки пропускание образца возрастает от начального (58%) до предельного ($\approx 95\%$) значения в полностью просветленном состоянии, что соответствует сравнительному показателю качества $\text{FOM} = \ln(0,58)/\ln(0,95) = 10,6$. Остаточное поглощение в полностью просветленном состоянии вызвано, главным образом, присутствием некоторого количества ионов кобальта в стеклянной матрице и, возможно, в алюмотитанатной кристаллической фазе. Анализ экспериментальных данных рис. 3 в рамках модели медленно релаксирующего насыщающегося поглотителя [11] свидетельствует о том, что коэффициент остаточного поглощения Co:MAC в полностью просветленном состоянии не превышает $0,15 \text{ см}^{-1}$, а поперечное сечение поглощения из основного состояния для ионов Co^{2+} $\sigma = 4,0 \times 10^{-19} \text{ см}^2$. Полученное значение σ согласуется со значениями эффективного се-

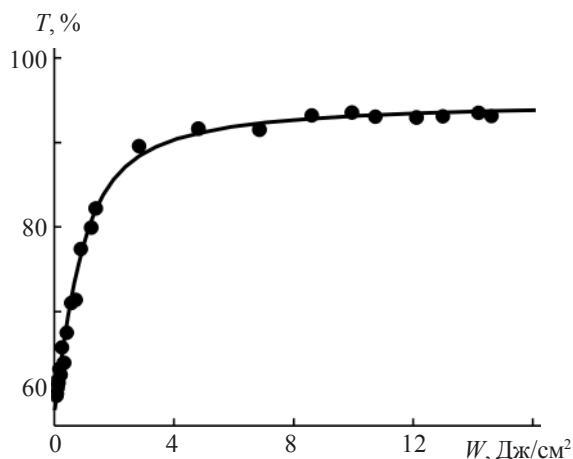


Рис. 3. Зависимость пропускания T стеклокристаллического материала Co:MAC толщиной 3,4 мм на длине волны 1,54 мкм от плотности потока энергии W падающих импульсов излучения длительностью 70 нс. Точками обозначены экспериментальные данные, сплошной кривой – расчетные. Данные по пропусканию скорректированы на потери излучения вследствие его отражения от поверхностей образца.

чения поглощения из основного состояния для тетракоординированных ионов Co^{2+} в монокристалле MgAl_2O_4 $[(2,6-5,1) \times 10^{-19} \text{ см}^2]$, которое в случае линейно-поляризованного света зависит от направления колебания электрического вектора и направления распространения излучения по отношению к кристаллографическим осям монокристалла [12]. Согласно [12] величина FOM для $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ составляет примерно 11. Таким образом, величина поперечного сечения поглощения для Co:MAC более чем в 60 раз превышает поперечное сечение усиления для эрбиевого стекла (порядка $6,2 \times 10^{-21} \text{ см}^2$). Относительно высокое значение σ в сочетании с большим временем релаксации просветления (приблизительно 270 нс) и достаточно большим FOM = 10,6 свидетельствуют о том, что стеклокристаллический материал Co:MAC является эффективным пассивным затвором для лазера на эрбиевом стекле.

В режиме модулированной добротности значение энергии выходного излучения ТСЛ с пассивным затвором достигало 1,3 мДж при длительности импульса 19 нс. В случае лазера с цилиндрическим АЭ при сравнимых уровнях накачки и длительности импульса энергия лазерного моноимпульса при пассивной модуляции добротности находилась на уровне 1,0 мДж.

Применение электрооптического затвора на основе ниобата лития позволило увеличить выходную

энергию генерируемого импульса излучения ТСЛ до 2,3 мДж. Энергия выходного импульса лазера с цилиндрическим АЭ и электрооптическим затвором не превышала 1,7 мДж.

Заключение

Разработан и исследован твердотельный слэб-лазер на эрбий-иттербиевом стекле с мощной поперечной диодной накачкой, излучающий на длине волны порядка 1,54 мкм. В режиме пассивной модуляции добротности при помощи затвора на основе материала Co:MAC достигнутое значение энергии выходного излучения слэб-лазера составило 1,3 мДж при длительности импульса 19 нс. Используя режим активной модуляции добротности, значение энергии лазерного импульса ТСЛ удалось повысить до 2,3 мДж. Дальнейшее повышение выходной мощности ограничивалось, в основном, мощностью используемых лазерных диодных линеек.

Коэффициент внутренних оптических потерь для активных элементов на основе Er, Yb:BCFS составляет 0,03–0,07 см^{-1} .

Результаты сравнительного анализа характеристик ТСЛ и лазера с цилиндрическим АЭ свидетельствуют о том, что при сравнимых уровнях накачки применение активных элементов со слэб-геометрией позволяет приблизительно в 1,5 раза повысить энергию выходных импульсов при практически 100% поляризации генерируемого излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шачкин Л.В. Yb, Er-лазер на фосфатном стекле с пассивной модуляцией добротности резонатора // Квант. электрон. 2006. Т. 36. № 2. С. 106–110.
2. Song F., Wu Z.H., Liu S.J., Cai H., Tian J.G., Zhang G.Y., Denker B., Sverchkov S. Passive Q-switch microchip Er, Yb glass laser pumped by laser diode // Chin. Phys. Lett. 2006. V. 23. № 5. P. 1195–1197.
3. Shi P., Li D., Zhang H., Wang Y., Du K. An 110 W Nd:YVO₄ slab laser with high beam quality output // Opt. Commun. 2004. V. 229. P. 349–354.
4. Gong M., Li C., Liu Q., Chen G., Gong W., Yan P. 200-W corner-pumped Yb:YAG slab laser // Appl. Phys. B. 2004. V. 79. P. 265–267.
5. So S., Mackenzie J.I., Shepherd D.P., Clarkson W.A., Betterton J.G., Gorton E.K. A power scaling strategy for longitudinally diode-pumped Tm:YLF lasers // Appl. Phys. B. 2006. V. 86. P. 389–393.
6. Tanaka K., Mukai T., Ishihara T., Hirao K., Soga N., Sogo S., Ashida M., Kato R. Preparation and optical properties of

- transparent glass-ceramics containing cobalt (II) ions // J. Am. Ceram. Soc. 1993. V. 76. P. 2839–2845.
7. *Yumashev K.V., Denisov I.A., Posnov N.N., Prokoshin P.V., Mikhailov V.P.* Nonlinear absorption properties of $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ crystal // Appl. Phys. B. 2000. V. 70. P. 179–184.
8. *Malyarevich A.M., Denisov I.A., Yumashev K.V., Dymshits O.S., Zhilin A.A.* Optical absorption and luminescence study of cobalt-doped magnesium aluminosilicate glass ceramics // JOSA B. 2002. V. 19. P. 1815–1821.
9. *Рябцев Г.И., Богданович М.В., Енжиевский А.И., Парашук В.В., Буров Л.И., Щемелев М.А., Рябцев А.Г., Машко В.В., Тепляшин Л.Л., Красковский А.С.* Пространственные и поляризационные свойства выходного пучка эрбий-иттербиевого лазера с поперечной диодной накачкой // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 5. С. 1014.
10. *Mashko V.V., Ryabtsev G.I., Bogdanovich M.V., Drakov A.S., Enzhyieuski A.I., Kostik O.E., Pozhidaev A.V., Ryabtsev A.G., Shemelev M.A., Teplyashin L.L.* Diode-pumped solid-state lasers with controlled parameters for spectroscopic applications // Publ. Astron. Obs. Belgrade. 2007. № 82. P. 149–156.
11. *Kuo Y.K., Huang M.F., Birnbaum M.* Tunable $\text{Cr}^{4+}:\text{YSO}$ Q-switched $\text{Cr}:\text{LiCAF}$ laser // IEEE J. Quantum Electronics. 1995. V. 31. P. 657–663.
12. *Volk Y.V., Malyarevich A.M., Yumashev K.V., Matrosov V.N., Matrosova T.A., Kupchenko M.I.* Anisotropy of nonlinear absorption in $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ crystal // Appl. Phys. B. 2007. V. 88. P. 443–447.
-