

Экспериментальное исследование слэб-лазера на кристалле $Tm:YLF$ с объемной брэгговской решеткой при различных параметрах элемента выходной связи*

Х.М. Дуань, Ю. Динг, Т.Ю. Дай, К. Чжао, Б.К. Яо

С помощью элемента выходной связи с различными параметрами исследована эффективность слэб-лазера на кристалле $Tm:YLF$. Использован слэб-кристалл a -среза длиной 20 мм с концентрацией ионов тулия 2.5 ат. %. С объемной брэгговской решеткой и эталоном Фабри–Перо выбранная длина волны излучения такого слэб-лазера составила 1908 нм. При использовании оптимизированного элемента выходной связи с пропусканием 20% и радиусом кривизны 300 мм выходная мощность превысила 74.1 Вт, а дифференциальная эффективность по поглощенной мощности накачки достигла 48.4%. Кроме того, было улучшено качество пучка слэб-лазера на $Tm:YLF$.

Ключевые слова: твердотельный лазер, диодная накачка, $Tm:YLF$, объемная брэгговская решетка.

1. Введение

Твердотельные лазеры, излучающие вблизи длин волн 2 мкм, могут использоваться во многих областях, таких как дистанционное зондирование, медицина и т. п. [1–3]. Легированные тулием материалы имеют целый ряд привлекательных особенностей, способствующих эффективной генерации света в этой области длин волн, включающих широкую полосу излучения, большое время жизни верхнего лазерного уровня, а также потенциал для роста квантовой эффективности из-за кросс-релаксационного процесса «два в одном» на один рабочий уровень [4]. Поэтому высокоомощные Tm -лазеры достаточно широко исследуются [5–7].

Кристаллы $Tm:YLF$ имеют спектроскопические характеристики, позволяющие использовать для их накачки диодные источники с относительно низкой яркостью. Спектр излучения кристалла перекрывает основные используемые линии поглощения в кристаллах, легированных ионами Ho [8–10]. Слэб-геометрии кристаллов $Tm:YLF$ позволяют в широких пределах масштабировать уровень накачки и, следовательно, выходной мощности посредством распределения тепловой нагрузки в горизонтальном направлении. Cheng с коллегами продемонстрировали непрерывный слэб-лазер на $Tm:YLF$ с односторонней накачкой, генерирующий выходную мощность 30.5 Вт на длине волны 1909 нм с дифференциальной эффективностью 31.3% [11]. В работе [12] создан непрерывный слэб-лазер на $Tm:YLF$ с выходной мощностью 148 Вт на длине волны 1912 нм и дифференциальной эффективностью 41% по отношению к поглощенной мощности накачки. Высокие средние мощности излуче-

ния (~200 Вт) такого лазера вблизи 1.9 мкм были достигнуты в работе [13]. Однако в этой статье более кратко обсуждались вопросы эффективности лазера.

Более стабильная длина волны и более узкая линия излучения $Tm:YLF$ -лазера позволяют достичь большей эффективности, чем в лазерах на кристаллах, легированных ионами Ho . Объемная брэгговская решетка (ОБР), используемая в твердотельных лазерах, имеет стабильность и селективность по длине волны, позволяющие реализовать узкую линию излучения лазера. В настоящей работе мы исследуем слэб-лазер на $Tm:YLF$ с ОБР, работающий на длине волны 1908 нм, с различными характеристиками элемента выходной связи. Для выходного элемента с пропусканием 20% и радиусом кривизны 300 мм выходная мощность составляет 74.1 Вт при полной мощности излучения накачки 270.3 Вт, что соответствует дифференциальной эффективности 48.4% по отношению к поглощенной мощности накачки.

2. Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Узел накачки представляет собой сборку из шести матриц лазерных диодов (ЛД), коллимированных по быстрой оси. Сборка имеет выходную мощность 300 Вт при температуре охлаждающей воды 25 °С. Измеренная центральная длина волны излучения накачки равнялась 788 нм на пороге генерации диодов и увеличивалась почти линейно до 792 нм при максимальном рабочем токе. Спектральная ширина излучения накачки составляла 1.5 нм. Цилиндрические линзы Л1 и Л2 с фокус-

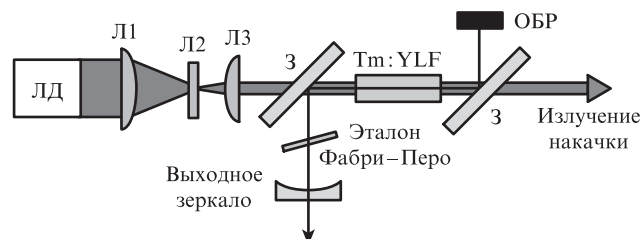


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

* Перевод с англ. В.В. Шувалова.

X.M. Duan, Y. Ding, T.Y. Dai, K. Zhao, B.Q. Yao. National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; e-mail: xmduan@hit.edu.cn

Поступила в редакцию 17 апреля 2014 г., после доработки – 29 мая 2014 г.

ными расстояниями 100 и 50 мм фокусировали пучок излучения диодных матриц по оси x до диаметра 4 мм. Цилиндрическая линза ЛЗ с фокусным расстоянием 80 мм коллимировала пучки излучения диодных матриц по оси y до диаметра 0.8 мм.

Слэб-кристалл Tm:YLF имеет концентрацию легирующей примеси 2.5 ат.%, толщину 1.5 мм, ширину 12 мм и длину 20 мм. Оба торца слэб-кристалла просветлены на длину волны 790 нм и на длину волны генерации ~ 1.09 мкм. Кристалл зажат между двумя охлаждаемыми водой медными теплоотводами с использованием индиевой фольги толщиной 0.1 мм. Температура воды, охлаждающей лазерный кристалл, поддерживалась на уровне 18°C. Изогнутый резонатор состоял из ОБР, двух плоских 45-градусных дихроичных зеркал Z с большими коэффициентами отражения ($r > 99.7\%$) в диапазоне длин волн 1.9–1.95 мкм и большими коэффициентами пропускания на длине волны излучения накачки ($T > 95\%$) и вогнутого выходного зеркала. Доля излучения накачки, поглощаемого на длине волны 792 нм, составляла 80%. Физическая длина резонатора была равна ~ 80 мм. Дифракционная эффективность ОБР превышала 99% для длины волны 1907.4 нм и угла падения 0.5°. Такой угол позволяет избежать нежелательных паразитных отражений. Селекция лазерной длины волны осуществлялась совместно ОБР и эталоном Фабри–Перо из кристалла YAG толщиной 0.3 мм.

3. Результаты экспериментов

В нашем эксперименте было исследовано влияние параметров выходного зеркала на мощность излучения слэб-лазера на Tm:YLF (рис.2). Использовались зеркала с радиусами кривизны 200 и 300 мм и различными коэффициентами пропускания. С точки зрения дифференциальной эффективности оптимальные коэффициенты пропускания

составили 30% и 20% для радиусов кривизны 200 и 300 мм. При этом пороги генерации равнялись 50.8 и 41.7 Вт при дифференциальной эффективности по отношению к поглощенной мощности накачки 48.4% и 46.3% соответственно. Для выходного зеркала с коэффициентом пропускания 30% и радиусом кривизны 200 мм была достигнута максимальная мощность непрерывного выходного излучения 74.1 Вт при мощности накачки 270.3 Вт. Для выходного зеркала с коэффициентом пропускания 20% и радиусом кривизны 300 мм максимальная мощность непрерывного выходного излучения составила 71.8 Вт при мощности накачки 256.4 Вт.

Для выходного зеркала с коэффициентом пропускания 30% и радиусом кривизны 200 мм длина волны лазерного излучения измерялась с помощью анализатора спектра EXFO WA-650 и измерителя длины волны EXFO WA-1500. При выходной мощности 1.5 Вт и ширине линии 0.1 нм пиковая длина волны составляла 1907.8 нм (рис.3), а при максимальной выходной мощности – 1908.1 нм. При

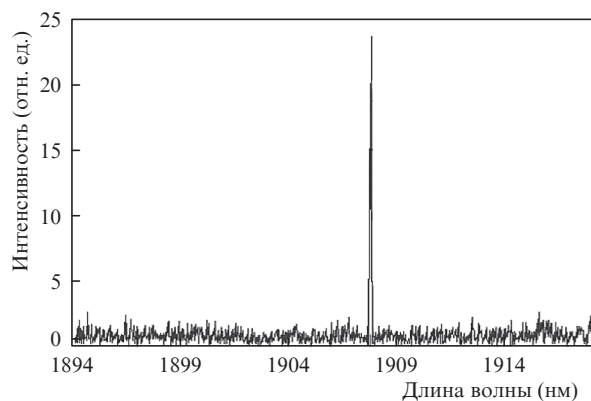


Рис.3. Спектр излучения слэб-лазера на Tm:YLF при мощности 1.5 Вт.

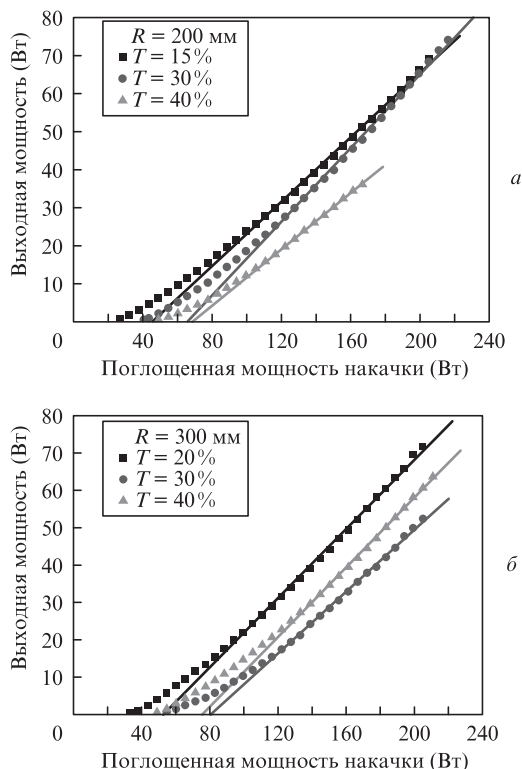


Рис.2. Зависимости мощности генерации от мощности поглощенной излучения накачки для $R = 200$ (а) и 300 мм (б).

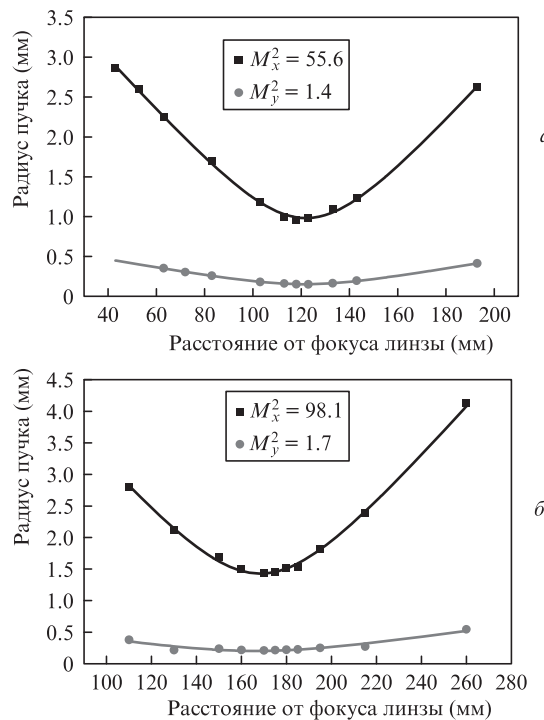


Рис.4. Коэффициент качества пучка M^2 при выходной мощности 20 (а) и 40 Вт (б).

изменении выходной мощности от 1.5 до 74.1 Вт сдвиг лазерной длины волны составил всего 0.3 нм.

Качество выходного пучка лазера измерялось с помощью подвижного клина. Рассчитанные параметры коэффициентов качества пучка M^2 при выходной мощности 20 и 40 Вт оказались равными 55.6 и 98.1 по оси x и 1.4 и 1.7 по оси y соответственно (рис.4). При этой же выходной мощности центральная длина волны излучения слэб-лазера на Tm:YLF с ОБР и эталоном Фабри–Перо была лучше согласована с пиком поглощения кристалла Ho:YAG, чем в работе [11]. Более того, использование ОБР и эталона Фабри–Перо в резонаторе слэб-лазера на Tm:YLF при более высоком уровне выходной мощности целесообразно не только для ограничения длины волны излучения, но и для улучшения качества лазерного пучка.

4. Заключение

В работе исследована эффективность слэб-лазера на Tm:YLF при различных параметрах элемента выходной связи. Длина волны излучения лазера была выбрана равной 1908 нм с помощью ОБР и эталона Фабри–Перо. Для оптимизированного элемента выходной связи с коэффициентом пропускания 20% и радиусом кривизны 300 мм выходная мощность превышала 74.1 Вт, а дифференциальная эффективность по отношению к поглощенной мощности накачки достигала 48.4%. Рассчитанные коэффициенты M^2 при выходных мощностях 20 и 40 Вт были равны 55.6 и 98.1 по оси x и 1.4 и 1.7 по оси y соответственно. Предметом будущей работы является мас-

штабирование лазера для достижения более высоких выходных мощностей, что включает в себя добавление другого слэб-кристалла и диодной сборки.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (№61308009), финансируемым проектом Китайского постдокского научного фонда (№2013M540288) и Фондами фундаментальных исследований для центральных университетов (грант №ННТ. NSRIF.2014044).

1. Carrig T.J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5620**, 187 (2004).
2. Yao B., Wang W., Yu K., Li G., Wang Y. *Chin. Opt. Lett.*, **10**, 071402 (2012).
3. Li G., Gu Y., Yao B., Shan L., Wang Y. *Chin. Opt. Lett.*, **11**, 091404 (2013).
4. So S., Mackenzie J.I., Shepherd D.P., Clarkson W.A., Betterton J.G., Gorton E.K. *Appl. Phys. B*, **84**, 389 (2006).
5. Yang J., Tang Y., Xu J. *Photon. Res.*, **1**, 52 (2013).
6. Guo C., Shen D., Long J., Wang F. *Chin. Opt. Lett.*, **10**, 091406 (2012).
7. Lv H., Zhou P., Xiao H., Wang X., Jiang Z. *Chin. Opt. Lett.*, **10**, 051403 (2012).
8. Yang X., Yao B., Ding Y., Li X., Aka G., Zheng L., Xu J. *Opt. Express*, **21**, 32566 (2013).
9. Lamrini S., Koopmann P., Schäfer M., Scholle K., Fuhrberg P. *Opt. Lett.*, **37**, 515 (2012).
10. Duan X.M., Yao B.Q., Yang X.T., Wang T.H., Ju Y.L., Wang Y.Z. *Appl. Phys. B*, **96**, 379 (2009).
11. Cheng X., Xu J., Hang Y., Zhao G., Zhang S. *Chin. Opt. Lett.*, **9**, 091406 (2011).
12. Schellhorn M., Ngcobo S., Bollig C. *Appl. Phys. B*, **94**, 195 (2009).
13. Li J., Yang S.H., Meissner A., Hofer M., Hoffmann D. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 055002 (2013).