

Плоский Ho:YAG-лазер мощностью 146.4 Вт на двух кристаллах с торцевой накачкой*

С.М.Дуань, И.Ц.Шень, Б.Ц.Яо, Ю.Ч.Ван

Сообщается о разработке мощного плоского Ho:YAG-лазера на двух кристаллах. Достигнута максимальная мощность 146.4 Вт в непрерывном режиме на длине волны 2090.7 нм, что соответствует дифференциальному КПД 66.0% и эффективности оптико-оптического преобразования 61.2%. Параметр качества пучка M^2 , измеренный при различных уровнях выходной мощности, составил менее 2.2. С применением акустооптической модуляции добротности были получены максимальные средние мощности 141.3, 137.7 и 134.5 Вт при частотах следования импульсов 20, 30 и 50 кГц соответственно. При этих же частотах следования импульсов достигнуты минимальные длительности импульса 39, 44 и 74 нс соответственно.

Ключевые слова: твердотельный лазер, Ho:YAG-лазер, высокая мощность.

1. Введение

Твердотельные лазеры, генерирующие в области 2 мкм, важны для многих приложений, таких как дистанционное зондирование [1], медицина [2], обработка материалов [3] и генерация излучения в среднем ИК диапазоне при использовании для накачки оптических параметрических генераторов (ОПГ) [4]. Легированные Ho лазеры с внутризонной накачкой, генерирующие на $\lambda = 1.9$ мкм, имеют низкий квантовый дефект, характеризуются высокой эффективностью преобразования, а также малой тепловой нагрузкой. В настоящее время это наилучшие мощные лазерные источники на длине волны 2 мкм. К тому же ионы Ho^{3+} с большим временем жизни верхнего лазерного уровня хорошо подходят для работы в режиме модуляции добротности. Следовательно, лазер с ионами гольмия в качестве легирующей примеси жизнеспособен как вариант импульсного лазера на длине волны 2 мкм с высокой средней выходной мощностью.

К настоящему времени продемонстрировано большое количество лазеров на основе различных базовых веществ, легированных ионами гольмия [5–9], однако сведений о Ho-лазерах с выходной мощностью на уровне 100 Вт совсем немного. Выходная мощность 83 Вт была достигнута в волоконном лазере, легированном ионами Tm и Ho [10]. Средняя выходная мощность 101 Вт при частоте следования импульсов $f = 30$ кГц была получена от

генератора на Ho:YAG с двумя стержнями в режиме модуляции добротности [11].

Кристалл YAG отличается от других кристаллов высокой теплопроводностью и выдающимися механическими свойствами, причем кристаллы YAG хорошего качества легко вырастить. Поэтому кристалл Ho:YAG хорошо подходит для мощного лазера. В настоящей работе с использованием структуры из двух плоских кристаллов Ho:YAG, накачиваемых с двух торцов, продемонстрирована выходная мощность 146.4 Вт в непрерывном режиме генерации. В режиме модуляции добротности получены средние выходные мощности 141.3, 137.7 и 134.5 Вт при $f = 20, 30$ и 50 кГц соответственно. Насколько нам известно, это наивысшая выходная мощность, достигнутая в Ho-лазерах как в непрерывном режиме, так и в режиме модуляции добротности при комнатной температуре. В обоих режимах центральная частота выходного излучения была равна 2090.7 нм. Установлено, что при различных уровнях выходной мощности измеренный параметр качества пучка $M^2 < 2.2$.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальная схема Ho:YAG-лазера с двумя плоскими кристаллами представлена на рис. 1. Для достижения высокого КПД и большой мощности использовалась накачка с двух торцов сфокусированным пучком. Источниками излучения накачки служили четыре Tm:YLF-лазера с диодной накачкой на $\lambda = 1908$ нм, стабилизированных с помощью объемных брэгговских решеток, которые обеспечивали максимальную выходную мощность 70 Вт и параметр качества пучка $M^2 = 2.4$. В резонаторе лазера находятся два плоских кристалла Ho:YAG, каждый из них накачивается с двух противоположных торцов ортогонально поляризованными пучками излучения Tm:YLF-лазеров. Излучение одного из лазеров накачки s-поляризовано, другого – p-поляризовано. Чтобы избежать взаимного влияния лазеров накачки, в эксперименте использовались четыре тонкопленочных

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

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

Y.J.Shen. School of Opto-electronic Information Science and Technology, Yantai University, Yantai 264005, China

Поступила в редакцию 24 апреля 2018 г., после доработки – 13 июня 2018 г.

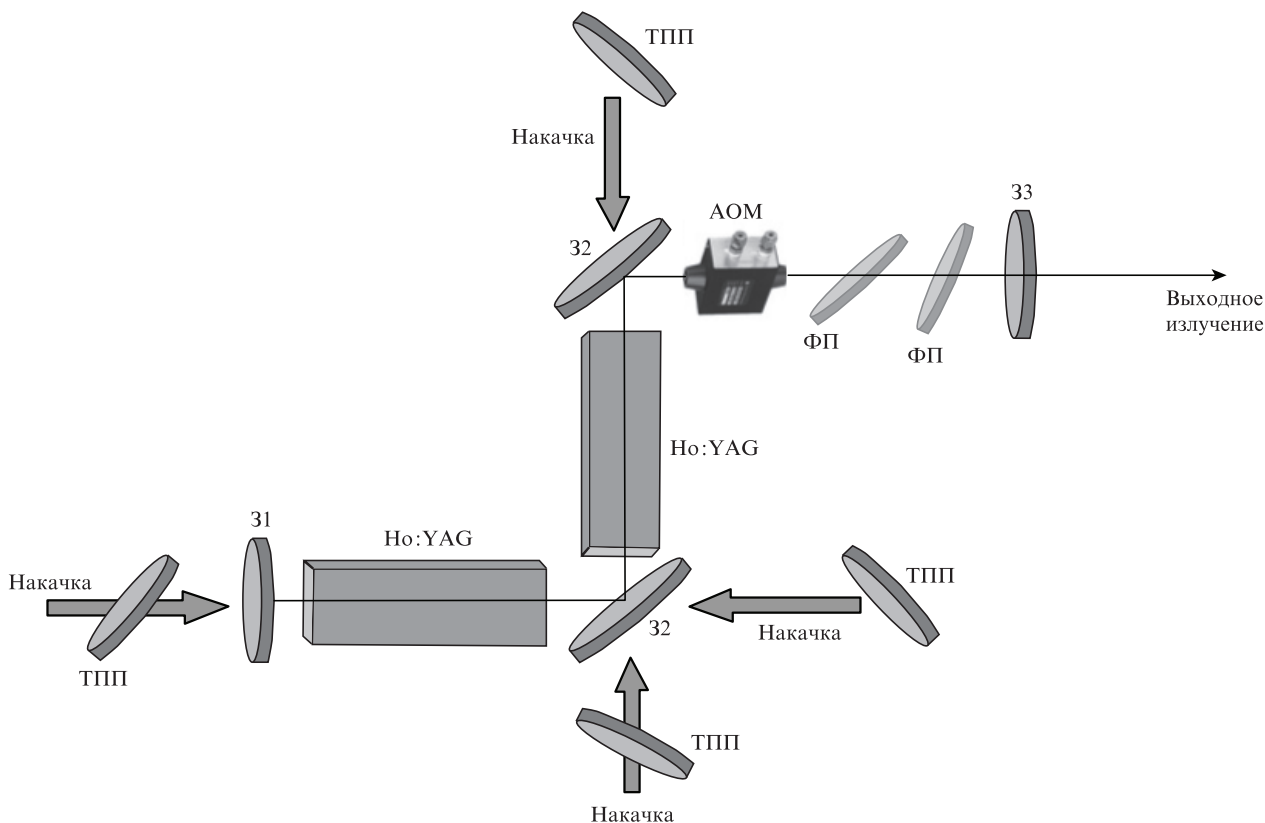


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

поляризатора (ТПП), обладающих сильным отражением для s-поляризованного излучения и большим пропусканием для р-поляризованного. Диаметр пучка, равный примерно 0.8 мм при мощности накачки 50 Вт, достигался путем фокусировки простой телескопической двухлинзовой системой.

Кристаллы Ho:YAG выращивались по методу Чохральского. На оба торца кристалла наносилось просветляющее покрытие на длины волн лазерного излучения и излучения накачки. Размеры плоского кристалла Ho:YAG с концентрацией примеси 0.8 ат.% составляли: ширина 5 мм, толщина 1.7 мм и длина 50 мм. По сравнению с кристаллом в форме стержня, плоский (тонкий и широкий) кристалл имеет большую площадь охлаждения, что существенно при больших мощностях накачки. Кристаллы были обернуты фольгой из индия и зажаты в медный радиатор с температурой 20 °С, поддерживаемой с помощью водяного охлаждения. Изломанный резонатор с физической длиной 295 мм был образован плоским дихроичным зеркалом 31, перпендикулярным оси пучка, двумя плоскими дихроичными зеркалами 32 и вогнутым выходным зеркалом связи 33 с радиусом кривизны 300 мм и коэффициентом пропускания 70%. Все дихроичные зеркала обеспечивали отражение на длине волны 2.09 мкм и высокое пропускание на 1.91 мкм. В резонатор были введены два эталона Фабри–Перо (ФП) из YAG толщиной по 0.1 мм, один из которых служил брюстеровской пластинкой для поддержания s-поляризации выходного излучения, а другой использовался для достижения его одночастотности. Для модуляции добротности применялся акустооптический модулятор (АОМ) (Gooch & Housego Corp.), управляемый радиочастотным напряжением с максимальной мощностью 100 Вт.

3. Результаты экспериментов

Для определения выходной мощности Ho:YAG-лазера в данном эксперименте использовался измеритель мощности Coherent PM150. При выключенном АОМе, когда Ho:YAG-лазер генерирует в непрерывном режиме, была достигнута максимальная выходная мощность 146.4 Вт при мощности падающего излучения накачки 239.3 Вт. Дифференциальный КПД и эффективность оптико-оптического преобразования составили 66.0% и 61.2% соответственно. Затем при включенном АОМе исследовалась работа Ho:YAG-лазера в режиме модуляции добротности. При $f = 50, 30$ и 20 кГц были достигну-

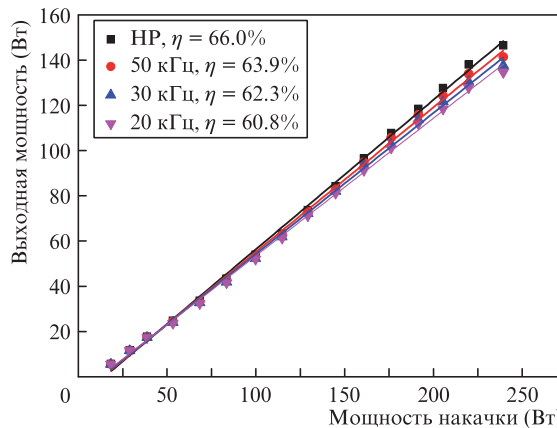


Рис.2. Зависимости выходной мощности Ho:YAG-лазера в непрерывном режиме (НР) и при модуляции добротности от мощности излучения накачки. Цветные изображения рис.2 и 3 помещены на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

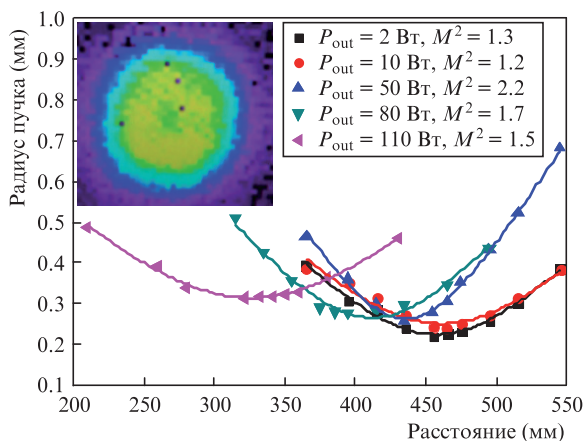


Рис.3. Измерение параметра M^2 в непрерывном режиме работы Но:YAG-лазера при различных значениях выходной мощности. На вставке – двумерный профиль пучка Но : YAG-лазера.

ты максимальные средние мощности на выходе 141.3, 137.7 и 134.5 Вт с дифференциальным КПД 63.9%, 62.3% и 60.8% соответственно. Полученные результаты приведены на рис.2. Насколько нам известно, это наибольшие значения выходной мощности Но:YAG-лазера, достигнутые в непрерывном режиме и в режиме модуляции добротности при комнатной температуре.

Затем мы исследовали параметр качества пучка и выходной спектр Но:YAG -лазера в непрерывном режиме. Радиус выходного пучка при различных значениях выходной мощности измерялся с помощью теневого метода (90/10) на разных расстояниях от выходного зеркала в области перетяжки, сформированной линзой с фокусным расстоянием 100 мм (рис.3). Путем подгонки стандартного выражения для гауссова пучка к полученным данным мы получили, что параметр качества пучка $M^2 = 1.3, 1.2, 2.2, 1.7$ и 1.5 при выходной мощности, равной 2, 10, 50, 80

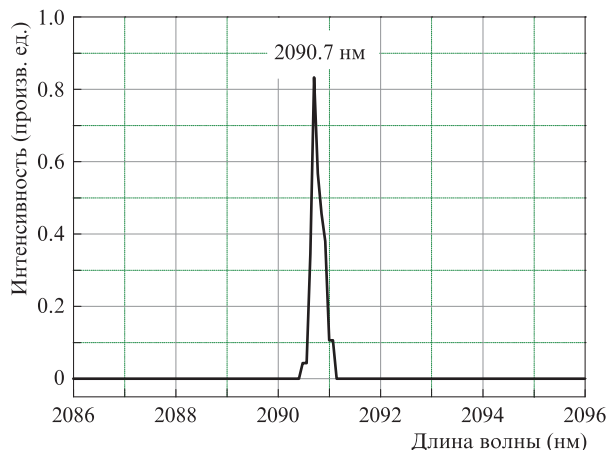


Рис.4. Выходной спектр Но:YAG-лазера в непрерывном режиме.

и 110 Вт соответственно. Профиль пучка Но-лазера при выходной мощности 110 Вт регистрировался камерой Spricon I (вставка на рис.3). Видно, что пучок распространяется в виде моды TEM_{00} .

Выходной спектр Но:YAG-лазера в непрерывном режиме записывался с помощью волномера Bristol 721A. При выходной мощности 10.0 Вт центральная длина волны Но : YAG-лазера равнялась 2090.7 нм при полной ширине линии на уровне половины максимума 0.3 нм (рис.4).

Импульсы излучения лазера в режиме модуляции добротности регистрировались при помощи цифрового осциллографа (Wavesurfer 64 Xs, Lecroy) с детектором из InGaAs. При мощности падающего излучения накачки 239.3 Вт были получены импульсы с минимальной длительностью 39, 44 и 74 нс при $f = 20, 30$ и 50 кГц соответственно. Максимальная энергия единичного импульса при тех же частотах следования составила 6.7, 4.6 и 2.8 мДж соответственно, что отвечает максимальной рас-

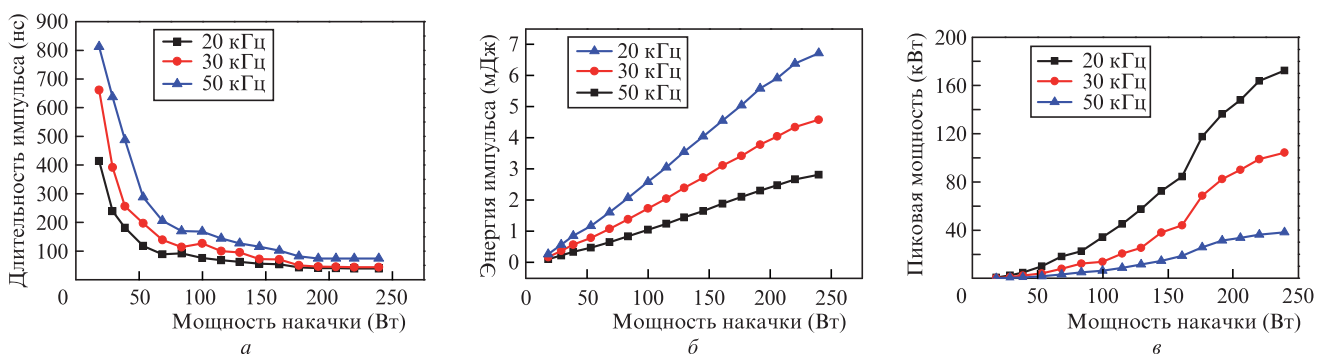


Рис.5. Зависимости длительности импульса (а), энергии импульса (б) и пиковой мощности (в) от мощности излучения накачки при частотах следования импульсов 20, 30 и 50 кГц.

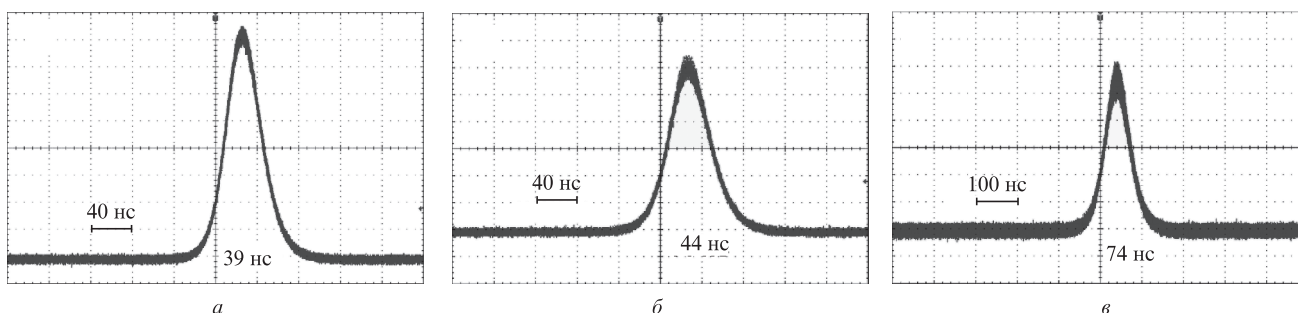


Рис.6. Профили импульсов излучения Но:YAG-лазера при частотах следования 20 (а), 30 (б) и 50 кГц (в).

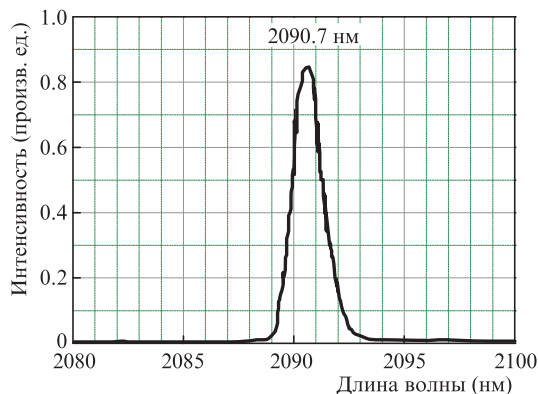


Рис.7. Спектр выходного излучения Ho:YAG-лазера с модуляцией добротности.

четной пиковой мощности 172.4, 104.3 и 38.2 кВт (рис.5). Профили импульсов минимальной длительности при максимальной мощности падающего излучения накачки представлены на рис.6. По интенсивности сигнала на рис.6 мы рассчитали контраст импульсов лазерной генерации, составивший 39, 25, и 24 дБ соответственно.

Спектр выходного излучения Ho:YAG-лазера с модуляцией добротности записывался с помощью решеточно-го монохроматора (300 штрих./мм). Для средней выходной мощности 10 Вт и $f = 20$ кГц центральная длина волны составила 2090.7 при ширине линии на уровне половины максимума 1.6 нм (рис.7).

4. Заключение

Итак, представлен плоский Ho:YAG-лазер, обладающий высокой мощностью и эффективностью как в непрерывном режиме, так и в режиме модуляции добротности. При мощности падающего излучения накачки 239.3 Вт получена максимальная мощность генерации в непре-

рывном режиме 146.4 Вт, что соответствует дифференциальному КПД 66.0% и эффективности оптико-оптического преобразования 61.2%. Измеренный при различных уровнях выходной мощности параметр качества пучка $M^2 < 2.2$. В режиме модуляции добротности максимальная средняя выходная мощность составила 141.3, 137.7 и 134.5 Вт при $f = 20, 30$ и 50 кГц соответственно. При этих же частотах следования импульсов достигнуты минимальные длительности импульса 39, 44 и 74 нс. Описанный Ho:YAG-лазер пригоден для накачки оптического параметрического генератора среднего ИК диапазона.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (грант №51572053), а также Фондами фундаментальных исследований для провинциальных университетов (грант №ВтL17B14).

1. Refaat T.F., Singh U.N., Petros M., Remus R., Yu J. *Appl. Opt.*, **54**, 7240 (2015).
2. Serebryakov V.S., Boiko É.V., Kalintsev A.G., Kornev A.F., Narivonchik A.S., Pavlova A.L. *J. Opt. Technol.*, **82**, 781 (2015).
3. Voisiat B., Gaponov D., Gečys P., Lavoute L., Silva M., Hideur A., Ducros N., Račiukaitis G. *Proc. SPIE*, **9350**, 935014 (2015).
4. Wang L., Xing T., Hu S., Wu X., Wu H., Wang J., Jiang H. *Opt. Express*, **25**, 3373 (2017).
5. Duan X.M., Yao B.Q., Li G., Wang T.H., Yang X.T., Wang Y.Z., Zhao G.J., Dong Q. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 279 (2008).
6. Fonnum H., Lippert E., Haakestad M.W. *Opt. Lett.*, **38**, 1884 (2013).
7. Yang X., Yao B., Ding Y., Li X., Aka G., Zheng L., Xu J. *Opt. Express*, **21**, 32566 (2013).
8. Yao B.Q., Ding Y., Duan X.M., Dai T.Y., Ju Y.L., Li L.J., He W.J. *Opt. Lett.*, **39**, 4755 (2014).
9. Дуань С.М., Цуй Цз., Ли Л.Цз., Дай Т.Й., Юй К.К., Яо Б.Ц. *Квантовая электроника*, **45**, 701 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 701 (2015)].
10. Jackson S.D., Sabella A., Hemming A., Bennetts S., Lancaster D.G. *Opt. Lett.*, **32**, 241 (2007).
11. Shen Y., Yao B., Duan X., Zhu G., Wang W., Ju Y., Wang Y. *Opt. Lett.*, **37**, 3558 (2012).