

Ho:YAG-лазер с двухсторонней накачкой и высокой выходной энергией*

С.М. Дуань, Цз.Цуй, Л.Цз.Ли, Т.Й.Дай, К.К.Юй, Б.Ц.Яо

Сообщается о Ho:YAG-генераторе с двухсторонней резонансной накачкой излучением Tm:YLF-лазеров, имеющем высокую выходную энергию при комнатной температуре. При частоте следования импульсов 100 Гц и длительности импульса 35.2 нс достигнута максимальная энергия импульса 52.5 мДж, что соответствует пиковой мощности примерно 1.5 МВт. Длина волны выходного излучения составила 2090.7 нм при коэффициенте качества пучка $M^2 \sim 1.2$.

Ключевые слова: двухмикронный лазер, Ho:YAG-лазер, высокая энергия.

1. Введение

Твердотельные лазеры, работающие в номинально безопасном для глаз двухмикронном диапазоне длин волн, имеют жизненно важное значение для приложений в медицине, лидарных системах, при обработке материалов, генерации в среднем ИК диапазоне (через накачку оптических параметрических генераторов (ОПГ)) [1–5]. Лазеры с высокой энергией на основе Ho являются идеальными источниками накачки для ОПГ [6–8]. Благодаря долгому времени жизни верхнего лазерного уровня легированные Ho твердотельные лазеры особенно привлекательны для работы в режиме модуляции добротности. Кроме того, прямая накачка ионов Ho имеет ряд преимуществ, таких как низкий дефект энергии квантов накачки и лазера, сниженные потери при преобразовании частоты вверх и более слабая чувствительность усиления к изменению температуры. Эти преимущества показывают возможность реализации лазера, легированного Ho, с высокой выходной энергией.

К настоящему времени достигнута выходная энергия криогенного Ho:YLF-генератора 550 мДж при частоте следования импульсов (ЧСИ) 1 Гц [9]. Сообщалось о получении энергии импульса 125 мДж при ЧСИ 100 Гц благодаря использованию системы с задающим Ho:YAG-генератором и усилителем мощности (МОРА) [10]. По сравнению с системой МОРА одиночный генератор импульсов может быть более компактным и простым для приложений. Общепринятыми лазерными матрицами для двухмикронной генерации являются YAG и YLF. Кристалл YAG имеет более высокую теплопроводность и лучшие механические свойства, чем YLF, причем кристаллы YAG хорошего качества легко выращиваются. Таким

образом, для получения высокой энергии нужен именно Ho:YAG-генератор. Сообщалось [11] о достижении энергии импульсов 50.6 мДж при ЧСИ 60 Гц, излучаемых Ho:YAG-генератором ($\lambda = 2.09$ мкм), накачиваемым импульсным Tm:YLF-лазером. Получены энергии импульсов, превышающие 30 мДж, в Ho:YAG-лазере ($\lambda = 2.09$ мкм) с диодной накачкой, работающем при ЧСИ 100 Гц [12].

В настоящей работе продемонстрирована высокая выходная энергия (52.5 мДж) в Ho:YAG-генераторе с резонансной двухсторонней накачкой двумя Tm:YLF-лазерами при ЧСИ 100 Гц. Получено выходное излучение на длине волны 2090.7 нм при длительности импульса 35.2 нс, что соответствует пиковой мощности примерно 1.5 МВт. Измеренный коэффициент качества пучка M^2 составил ~ 1.2 .

2. Экспериментальная установка

Принципиальная схема Ho:YAG-генератора показана на рис.1. Два Tm:YLF-лазера ($\lambda_p = 1908$ нм) с максимальной выходной мощностью 40 Вт каждый, исполь-

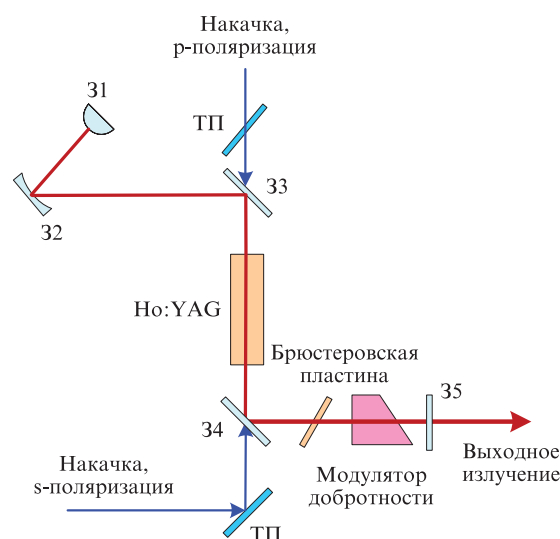


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

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

L.J.Li. Institute of Optoelectronic Technology, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150001, China

зующие диодную накачку, служили для возбуждения генератора. Излучение одного из лазеров было s-поляризовано, а излучение другого – р-поляризовано. Радиус пучка накачки в кристалле Ho:YAG составил 450 мкм. Тонкопленочный поляризатор (ТП) имел высокое отражение для s-поляризованной накачки и высокое пропускание для р-поляризованной накачки. В генераторе два ТП использовались с тем, чтобы избежать взаимного влияния Tm:YLF -лазеров друг на друга. Кристалл Ho:YAG , выращенный методом Чохральского, представлял собой стержень диаметром 5 мм и длиной 50 мм; концентрация Ho составляла 0.8 ат.%. Обе торцевые грани кристалла просветлены для длины волны лазерного излучения в окрестности 2.1 мкм и длины волны накачки в окрестности 1.9 мкм. Коэффициент поглощения Ho:YAG в генераторе на $\lambda_p = 1.91$ мкм был около 0.56 см^{-1} , что обеспечивало почти 96%-ное поглощение накачки в кристалле. Кристалл Ho:YAG , завернутый в индиевую фольгу, закреплялся в медном радиаторе, температура которого поддерживалась около 18°C термоэлектрическим холодильником. Резонатор длиной ~ 670 мм был образован выпуклым высокоотражающим зеркалом 31 с радиусом кривизны $R = 200$ мм, вогнутым высокоотражающим зеркалом 32 ($R = 500$ мм), двумя 45° -ными дихроичными зеркалами 33, 34 и плоским выходным зеркалом 35 с пропусканием $T = 40\%$. Дихроичные зеркала 33 и 34 имели высокое отражение на $\lambda_{\text{ген}} = 2.09$ мкм и высокое пропускание на $\lambda_p = 1.91$ мкм. Для получения линейно поляризованного выхода в качестве брестеровской пластинки использовался эталон из YAG . Модуляция добротности обеспечивалась акустооптическим модулятором длиной 50 мм. Максимальная радиочастотная мощность модулятора составляла 100 Вт.

3. Экспериментальные результаты

Выходная энергия Ho:YAG -лазера измерялась при ЧСИ 100, 500 и 1000 Гц (рис.2). При ЧСИ 100 Гц максимальная выходная энергия была 52.5 мДж при мощности падающей накачки 75.6 Вт. При ЧСИ 500 и 1000 Гц максимальная выходная энергия составила 19.4 и 10.0 мДж соответственно. Лазерные импульсы в режиме модуляции добротности регистрировались цифровым осциллографом Wavesurfer 64 Xs (Lecroy) с InGaAs -детектором. Измеренная зависимость длительности лазерного импульса от мощности падающей накачки при ЧСИ 100 Гц по-

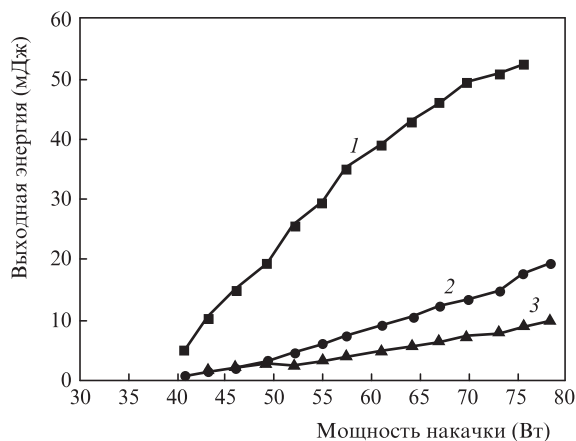


Рис.2. Зависимость выходной энергии Ho:YAG -лазера от мощности накачки при ЧСИ 100 (1), 500 (2) и 1000 Гц (3).

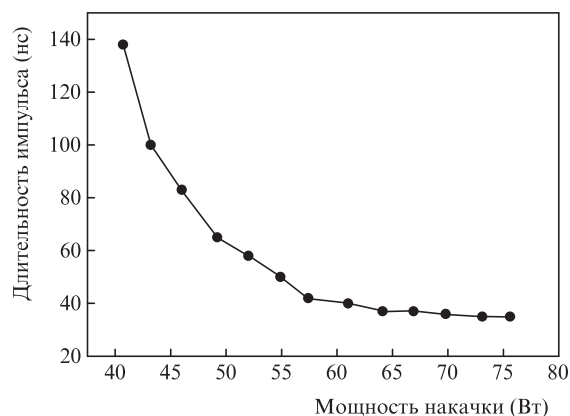


Рис.3. Зависимость длительности импульса от мощности падающей накачки при ЧСИ 100 Гц.

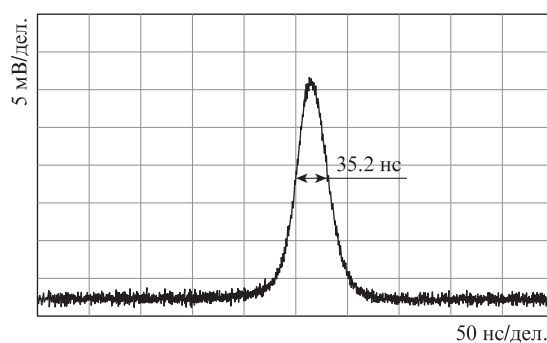


Рис.4. Осциллограмма импульса Ho:YAG -лазера при ЧСИ 100 Гц.

казана на рис.3. Длительность импульса резко сокращалась с ростом мощности падающей накачки. Минимальная длительность импульса составила 35.2 нс при мощности падающей накачки 75.6 Вт (рис.4), что соответствует пиковой мощности примерно 1.5 МВт.

Выходная длина волны Ho:YAG -генератора регистрировалась с помощью решеточного монохроматора. При энергии импульса 52.5 мДж длина волны сцентрирована на 2090.7 нм (рис.5). Радиус выходного пучка генератора измерялся посредством ножевого (90/10) метода в нескольких положениях до и после перетяжки, сформированной линзой ($f = 150$ мм). Аппроксимация этих данных стандартным выражением для гауссова пучка позволила оценить коэффициент качества пучка $M^2 \sim 1.2$ (рис.6).

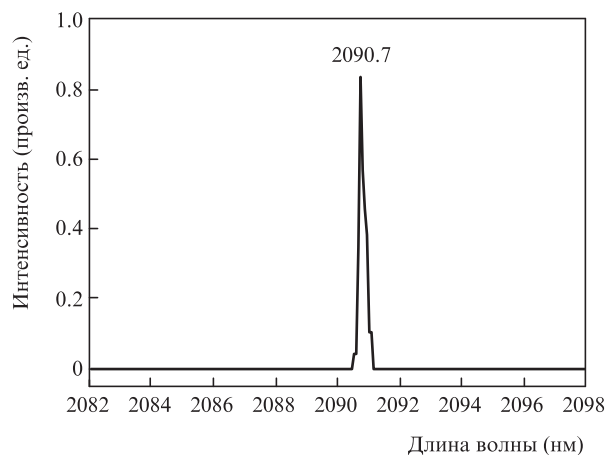


Рис.5. Спектр излучения Ho:YAG -генератора.

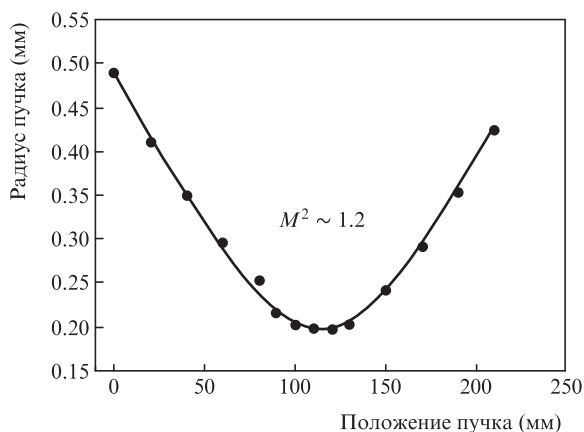


Рис.6. Оценочная кривая качества пучка Ho:YAG-генератора.

4. Заключение

Продемонстрирован Ho:YAG-генератор ($\lambda = 2090.7$ нм) высокой энергии, работающий при комнатной температуре, с двухсторонней резонансной накачкой двумя Tm:YLF-лазерами. В режиме модуляции добротности максимальная выходная энергия при ЧСИ 100 Гц составила 52.5 мДж, что соответствует пиковой мощности примерно 1.5 МВт

при длительности импульса 35.2 нс. Коэффициент качества пучка ($M^2 \sim 1.2$) измерялся ножевым (90/10) методом.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (№ 61308009 и 61378029) и проектом, финансируемым Китайским научным фондом Postdoctoral (№ 2013M540288).

1. Carrig T.J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5620**, 187 (2004).
2. Yang J., Tang Y., Xu J. *Photon. Res.*, **1**, 52 (2013).
3. Guo C., Shen D., Long J., Wang F. *Chin. Opt. Lett.*, **10**, 091406 (2012).
4. Stoepler G., Thilmann N., Pasiskevicius V., Zukauskas A., Canalias C., Eichhorn M. *Opt. Express*, **20**, 4509 (2012).
5. Yao B., Wang W., Yu K., Li G., Wang Y. *Chin. Opt. Lett.*, **10**, 071402 (2012).
6. Li G., Gu Y., Yao B., Shan L., Wang Y. *Chin. Opt. Lett.*, **11**, 091404 (2013).
7. Haakestad M.W., Fonnum H., Lippert E. *Opt. Express*, **22**, 8556 (2014).
8. Lee H.R., Yu J., Barnes N.P., Bai Y., in *Advanced Solid-State Photon. (TOPS) (OSA Trends in Optics and Photonics, 2004, vol. 94, paper 394)*.
9. Fonnum H., Lippert E., Haakestad M.W. *Opt. Lett.*, **38**, 1884 (2013).
10. Schmidt K., Reiter C., Voss H., Maßmann F., Ostermeyer M. *CLEO/Europe QEC Conf. Digest* (Munich, 2011, paper CA3_4).
11. Budni P.A., Ibach C.R., Setzler S.D., Gustafson E.J., Castro R.T., Chicklis E.P. *Opt. Lett.*, **28**, 1016 (2003).
12. Lamrini S., Koopmann P., Schäfer M., Scholle K., Fuhrberg P. *Opt. Lett.*, **37**, 515 (2012).