

## Непрерывный режим и режим активной модуляции добротности резонансного лазера на керамике Er:YAG с двухсторонней накачкой, генерирующего излучение вблизи 1.6 мкм

Т.И.Дай, Ю.Дэнг, Ю.Л.Ю, Б.Ц.Яо, С.М.Дуань, Ю.З.Вонг

*Продemonстрированы непрерывный режим и режим активной модуляции добротности лазера на керамике Er:YAG с двухсторонней резонансной накачкой излучением ( $\lambda = 1532$  нм) лазерного диода с волоконным выходом. Получена максимальная выходная мощность непрерывного излучения 1.48 Вт на длине волны 1645.3 нм при поглощенной мощности накачки 12.72 Вт, что соответствует дифференциальной эффективности 19.2%. В режиме модуляции добротности достигнута максимальная энергия импульса 0.84 мДж при частоте повторения 100 Гц, длительности импульса 48.03 нс и поглощенной мощности накачки 10.51 Вт.*

**Ключевые слова:** лазер с диодной накачкой, лазер на керамике Er:YAG, модулированная добротность.

Лазерные источники с длиной волны излучения в безопасной для глаз области вблизи 1.6 мкм широко применяются в лидарном и дистанционном мониторинге. К ним относятся твердотельные лазеры на основе сред, легированных ионами Er<sup>3+</sup>. Кроме того, такие лазеры с активной модуляцией добротности перспективны для дистанционного зондирования, измерения дальности и космической связи. В последние несколько лет монокристаллы Er:YAG являются одними из самых привлекательных материалов для непрерывных и импульсных лазеров, излучающих вблизи  $\lambda \approx 1.6$  мкм, в связи с хорошими термомеханическими свойствами и большим (примерно 6.5 мс) временем жизни верхнего рабочего состояния <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> [1].

Однако поликристаллическая Er:YAG-керамика имеет многочисленные преимущества по сравнению с монокристаллом Er:YAG, например возможность быстрого производства сред большого объема и варьирования в больших пределах концентрации легирующей примеси, низкая стоимость и т. д. [2–4]. Важно также, что Er:YAG-керамика имеет спектроскопические параметры и эффективность генерации, сходные с аналогичными характеристиками монокристаллов. За последнее время опубликованы многочисленные работы, посвященные лазерам на поликристаллической Er:YAG-керамике, генерирующим излучение с длиной волны вблизи 1.6 мкм. Получена максимальная выходная мощность непрерывного излучения 13.8 и 14 Вт с дифференциальными эффективностями 54.5% и 51.7% на длинах волн  $\lambda = 1645$  и 1617 нм соответственно [5, 6]. Была продемонстрирована работа поликристаллических лазеров на керамике Er:YAG в режиме пассивной модуляции добротности, излучающих на  $\lambda = 1645$  или 1617 нм, с использованием графенового насыщающегося поглотителя. В 2013 г. была продемонстри-

рована эффективная пассивная модуляция добротности поликристаллического лазера на керамике Er:YAG с энергией в импульсе 7.08 мкДж и частотой повторения импульсов излучения 74.6 кГц на  $\lambda = 1645$  нм [7]. В работе [8] сообщается о пассивной модуляции добротности лазера на керамике Er:YAG с энергией в импульсе 12.2 мкДж и частотой повторения импульсов излучения 54.4 кГц на  $\lambda = 1617$  нм. В [9] описана работа лазеров на керамике Er:YAG в непрерывном режиме и в режиме модуляции добротности с длительностями импульсов 1.5–6.4 мкс. По сравнению с лазерами с пассивной модуляцией добротности лазеры с активной модуляцией позволяют получать более короткие импульсы с большей энергией, что способствует их использованию в сканирующих когерентных лазерных радарх. Насколько нам известно, сообщений о работе лазера на керамике Er:YAG в режиме активной модуляции добротности до сих пор не было.

В этой работе мы сообщаем о непрерывном лазере на керамике Er:YAG с двухсторонней резонансной накачкой лазерными диодами, который имеет максимальную выходную мощность 1.48 Вт на  $\lambda = 1645.3$  нм при дифференциальной эффективности 19.2%, и описываем работу этого лазера в режиме акустооптической модуляции добротности.

Схема конфигурации лазера на керамике Er:YAG с двухсторонней накачкой показана на рис.1. Для непрерывного режима и режима модуляции добротности использована простая трехзеркальная конфигурация L-типа. Она состоит из плоских входных зеркал 31 и 32. Оба зер-

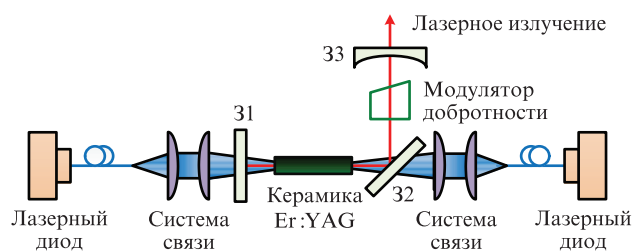


Рис.1. Схема лазера на керамике Er:YAG с двухсторонней накачкой.

\* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

T.Y.Dai, Y.Deng, Y.L.Yu, B.Q.Yao, X.M.Duan, Y.Z.Wang. National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; e-mail: daitongyu2006@126.com

кала имеют большие коэффициенты пропускания (более 98%) на длине волны излучения накачки 1532 нм и отражения (более 99%) на длине волны генерации 1.6 мкм. Вогнутое выходное зеркало 33 с радиусом кривизны 200 мм имеет коэффициент пропускания 3.5% на длине волны генерации и большой коэффициент отражения на длине волны накачки. Физическая длина резонатора составляет 130 мм. Накачка обеспечивается двумя лазерными диодами с волоконными выходами с диаметрами сердцевин 200 мкм и числовой апертурой 0.22. Максимальная выходная мощность лазерного диода составляет 15 Вт, а длина волны его излучения может изменяться путем варьирования его рабочей температуры. Пучки излучения накачки фокусируются в середину поликристаллического керамического элемента из Er:YAG с помощью систем связи, состоящих из двух линз с фокусными расстояниями 20 и 60 мм. Размеры отполированного поликристаллического керамического элемента из Er:YAG с уровнем легирования Er<sup>3+</sup> 0.5 ат.% составляли 1.2×3×16 мм. Лазерный элемент был обернут индиевой фольгой и смонтирован на медном радиаторе с водяным охлаждением. Для реализации режима модуляции добротности использовался акустооптический модулятор длиной 30 мм с малыми вносимыми потерями. Максимальная радиочастотная мощность, потребляемая модулятором, составляла 25 Вт, а его собственные дифракционные потери равнялись 62.5%, что было достаточно для предотвращения генерации.

Сначала было проведено сравнительное исследование непрерывного лазера на керамике Er:YAG с двумя выходными зеркалами с коэффициентами пропускания  $T = 3.5\%$  и  $10\%$ . На рис.2 представлены зависимости выходной мощности лазера от поглощенной мощности накачки при использовании выходных зеркал с  $T = 3.5\%$  и  $10\%$ . С выходным зеркалом с  $T = 3.5\%$  была достигнута максимальная мощность непрерывного излучения 1.48 Вт с дифференциальной эффективностью 19.2% при поглощенной мощности накачки 12.72 Вт. Определенное по зависимости рис.2 значение порога генерации лазера на керамике Er:YAG составило 4.7 Вт. Как можно видеть, выходная мощность может быть еще увеличена путем увеличения мощности накачки. Малая эффективность генерации может быть связана с недостаточно хорошим согласованием длины волны излучения лазерных диодов с пиком поглощения поликристаллической керамики Er:YAG, который узок вблизи 1532 нм, а длина волны излучения ла-

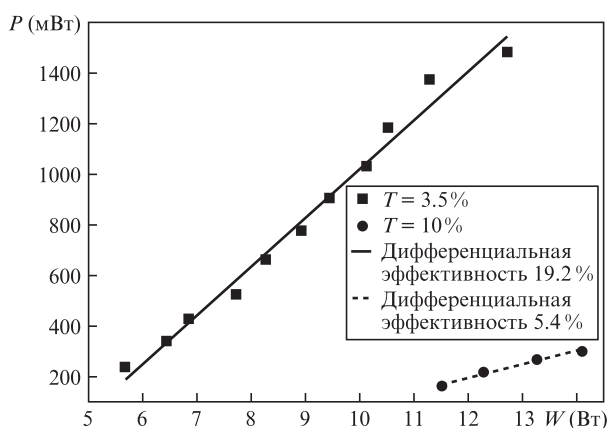


Рис.2. Выходная мощность  $P$  в зависимости от поглощенной мощности накачки  $W$  для непрерывного лазера на керамике Er:YAG при различном пропускании выходного зеркала.

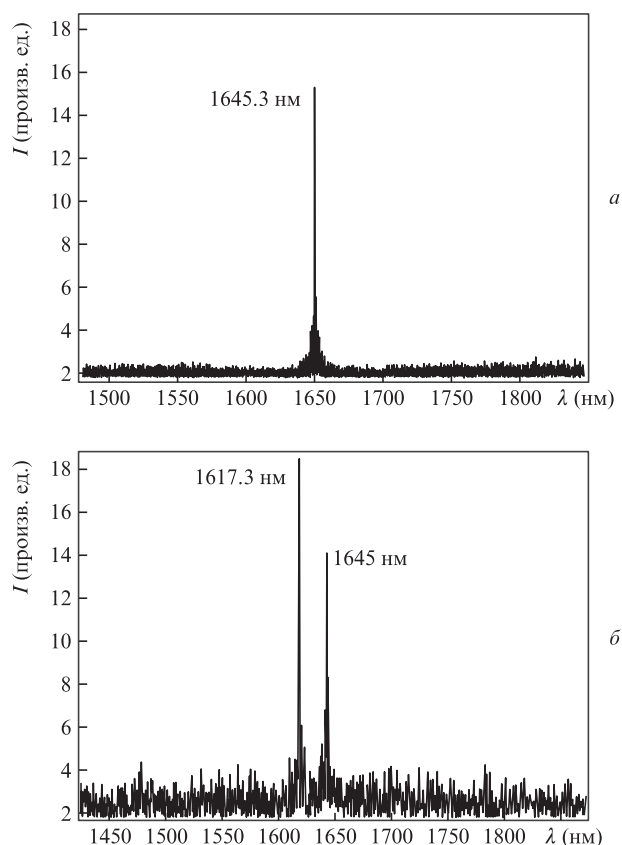


Рис.3. Спектр излучения непрерывного лазера на керамике Er:YAG при коэффициентах пропускания выходного зеркала  $T = 3.5\%$  (а) и  $10\%$  (б).

зерных диодов дрейфует с увеличением их выходной мощности. Выходной спектр излучения непрерывного керамического лазера был зарегистрирован с помощью ИК анализатора спектра Bristol 721A. Для случая выходного зеркала с  $T = 3.5\%$  он представлен на рис.3,а. Пик интенсивности излучения соответствует  $\lambda = 1645.3$  нм.

С выходным зеркалом с  $T = 10\%$  максимальная выходная мощность и дифференциальная эффективность непрерывного лазера на керамике Er:YAG резко снизились по сравнению со случаем выходного зеркала с  $T = 3.5\%$  и составили 302 мВт и 5.4% соответственно, а порог генерации увеличился до 8.43 Вт. Спектр излучения непрерывного лазера на керамике с выходным зеркалом с  $T = 10\%$  приведен на рис.3,б. Лазер генерировал более интенсивное излучение на  $\lambda = 1617.3$  нм и менее интенсивное на  $\lambda = 1645$  нм. Очевидно, что лазер, работающий на  $\lambda = 1617$  нм, имеет более высокий порог генерации, поскольку в этом случае для достижения инверсии требуется больше возбужденных ионов Er<sup>3+</sup> (примерно 14%) на верхнем лазерном уровне, и меньшую дифференциальную эффективность. Чтобы получить лазерную генерацию только на  $\lambda = 1617$  нм, требуется инверсия населенности ионов Er<sup>3+</sup>, равная по крайней мере 35% [10].

Характеристики лазера на керамике Er:YAG с модуляцией добротности исследовались с использованием выходного зеркала с  $T = 3.5\%$ . На рис.4 представлены измеренные энергии импульсов лазера в режиме модуляции добротности при разных частотах повторения импульсов в зависимости от поглощенной мощности накачки. Как видно из рис.4, энергия импульса растет с увеличением поглощенной мощности накачки, и эта энергия при мень-

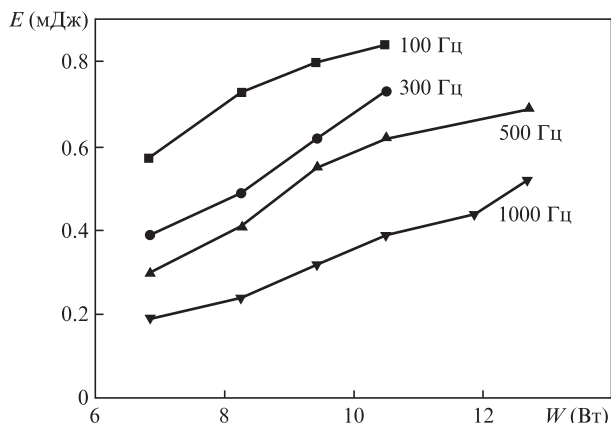


Рис.4. Энергия импульса  $E$  лазера на керамике Er:YAG в режиме модуляции добротности в зависимости от поглощенной мощности накачки при различных частотах повторения импульсов.

шей частоте повторения больше, чем энергия при более высокой частоте повторения. Максимальная энергия импульса 0.84 мДж была получена при частоте повторения 100 Гц и поглощенной мощности накачки 10.51 Вт. На рис.5 представлены измеренные длительности импульсов лазера в зависимости от поглощенной мощности накачки при разных частотах повторения. Видно, что длительность импульса уменьшается с увеличением поглощенной мощности накачки, и при одной и той же поглощенной мощности длительность импульсов становится меньше, когда уменьшается частота их повторения. При частоте повторения 100 Гц и поглощенной мощности накачки 10.51 Вт была достигнута минимальная ширина импульса 48.03 нс (рис.6).

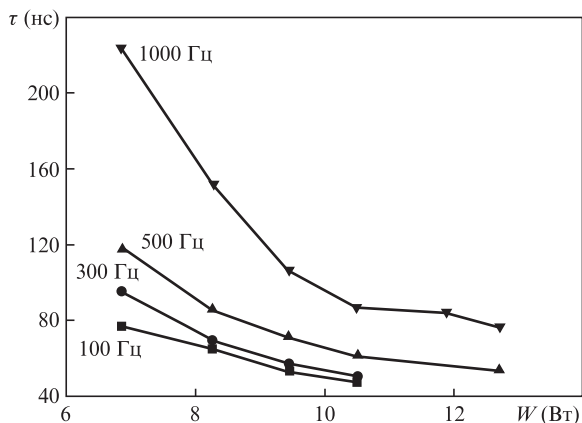


Рис.5. Длительность импульса  $\tau$  лазера на керамике Er:YAG в режиме модуляции добротности в зависимости от поглощенной мощности накачки при различных частотах повторения импульсов.

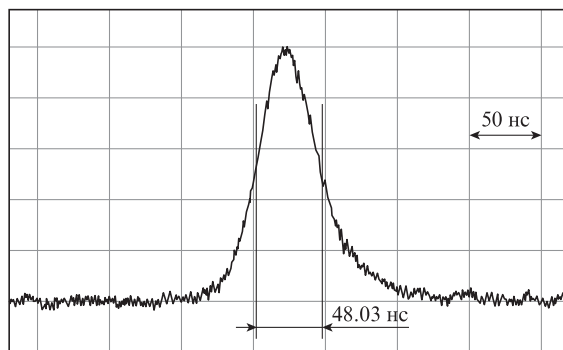


Рис.6. Импульс лазера на керамике Er:YAG минимальной длительности.

Таким образом, в работе представлены результаты исследования лазера на керамике Er:YAG, генерирующего излучение в непрерывном режиме и в режиме активной модуляции добротности на  $\lambda = 1.6$  мкм. Лазер накачивался с двух сторон двумя лазерными диодами с волоконным выходом. Была получена максимальная мощность 1.48 Вт непрерывного излучения на  $\lambda = 1645.3$  нм с дифференциальной эффективностью 19.2% при поглощенной мощности накачки 12.72 Вт. В режиме модуляции добротности была достигнута максимальная энергия одиночного импульса 0.84 мДж при частоте повторения 100 Гц, поглощенной мощности накачки 10.51 Вт и длительности импульса 48.03 нс. Дальнейшая работа будет направлена на оптимизацию длины кристалла, концентрации легирующей примеси и параметров резонатора.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (грант №61405047), Научным фондом для выдающейся молодежи провинции Хейлунцзян (JQ201310) и Фондом фундаментальных исследований для Центральных университетов (грант № HIT.NSRIF.2015042).

1. Strange H., Petermann K., Huber G., Duczynski E.W. *Appl. Phys. B*, **49**, 269 (1989).
2. Ikesue A., Kinoshita T., Kamata K., Yoshita K. *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**, 1033 (1995).
3. Ikesue A., Aung Y.L. *Nature Photon.*, **2**, 721 (2008).
4. Wisdom J., Digonnet M., Byer R.L. *Photon. Spectra*, **38**, 50 (2004).
5. Shen D.Y., Chen H., Qin X.P., Zhang J., Tang D.Y., Yang X.F., Zhao T. *Appl. Phys. Express*, **4**, 052701 (2011).
6. Zhang C., Shen D.Y., Wang Y., Qian L.J., Zhang J., Qin X.P., Tang D.Y., Yang X.F., Zhao T. *Opt. Lett.*, **36**, 24 (2011).
7. Zhu Z.X., Wang Y., Chen H., Huang H.T., Shen D.Y., Zhang J., Tang D.Y. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 055801 (2013).
8. Zhang X.Q., Liu J., Shen D.Y., Yang X.F., Tang D.Y., Fan D.Y. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **25**, 13 (2013).
9. Wang Y., Chen H., Shen D.Y., Zhang J., Tang D.Y. *J. Opt. Soc. Korea*, **17**, 5 (2013).
10. Setzler S.D., Francis M.P., Young Y.E., Konves J.R., Chicklis E.P. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **11**, 645 (2005).