

# Спектрально-генерационные характеристики керамики 1% Ho:YAG при внутрирезонаторной накачке

С.Н.Багаев, В.В.Осипов, С.М.Ватник, В.А.Шитов, И.А.Ведин,  
П.Ф.Курбатов, Р.Н.Максимов, К.Е.Лукьяшин, А.А.Павлюк

*Синтезирована высокопрозрачная 1% Ho:YAG-керамика из смеси полученных лазерным методом нанопорошков Ho:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, с коэффициентом светопропускания в ИК области более 82% при толщине образца 1 мм. Представлены результаты исследований спектрально-генерационных характеристик керамики 1% Ho:YAG при внутрирезонаторной накачке излучением дискового элемента 5% Tm:KLuW. На основе анализа спектральной интенсивности генерации в диапазоне 1.8–2.1 мкм и параметров резонатора сделана оценка дифференциальной эффективности генерации керамики 1% Ho:YAG, составившей около 40%.*

**Ключевые слова:** керамические лазеры, тонкие диски, диодная накачка, двухмикронный спектральный диапазон.

## 1. Введение

Лазерные источники двухмикронного диапазона представляют значительный интерес для целого ряда приложений, включая дистанционное зондирование атмосферы [1, 2], дальнометрию [3], экологический мониторинг [4, 5], а также накачку оптических параметрических преобразователей [6–8]. Использование в качестве активных элементов высокопрозрачных лазерных керамик существенно расширяет возможности таких лазерных систем прежде всего за счёт повышения удельного энергоёмкости и улучшения КПД генерации [9, 10]. В [11–13] исследованы генерационные характеристики керамик Ho:YAG при накачке в максимум поглощения на длине волны 1.907 мкм, получены выходная мощность генерации свыше 20 Вт и дифференциальная эффективность более 60%, что вплотную приближается к аналогичным параметрам для монокристаллических активных элементов [8, 14]. В настоящей работе впервые представлены результаты экспериментов по изучению спектрально-генерационных характеристик высокопрозрачной керамики 1% Ho:YAG в условиях внутрирезонаторной накачки. На основании полученных результатов дана оценка дифференциальной эффективности генерации образца исследуемой керамики.

## 2. Эксперимент

### 2.1. Получение керамики

Грубые коммерческие порошки Ho<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с чистотой не менее 99.99% были выбраны для изготовле-

ния лазерных мишеней двух составов (Ho<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) с последующим их испарением CO<sub>2</sub>-лазером. При конденсации пара в потоке воздуха образовывались наночастицы со средним размером 15 нм. Более подробно технология лазерного синтеза оксидных нанопорошков описана в [15].

Далее нанопорошки оксидов Ho<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> смешивались в соотношении (Ho + Y):Al = 3:5 в течение 48 ч в этиловом спирте с шарами из оксида циркония. На стадии смешивания в качестве спекающей добавки использовался тетраэтилортосиликат (TEOS) в количестве 0.5 мас. %. Соотношение масс нанопорошка, шаров и спирта было 1:4:8 соответственно. Затем смесь подвергалась выпариванию в вакуумном ротационном испарителе и отжигу на воздухе при температуре 600 °С в течение 3 ч для удаления органических примесей. При этом агломерации нанопорошков не наблюдалось.

Из сухой отожжённой смеси нанопорошков формировались брикеты с относительной плотностью 20% с последующим прокаливанием в атмосферной печи при температуре 1200 °С в течение 3 ч. Затем эти брикеты подвергались размолу шарами из оксида циркония в течение 48 ч, выпариванию и сушке.

Компактирование полученных размолов в диски диаметром 15 мм и толщиной 2–4 мм осуществлялось методом сухого одноосного статического прессования при давлении 200 МПа. Плотность компактов 1% Ho:YAG составляла 2.18 г/см<sup>3</sup>, что соответствовало относительной плотности 47.9%. Далее компакты спекались в вакуумной печи при температуре 1780 °С в течение 20 ч. В дальнейшем полученные образцы керамики подвергались атмосферному отжигу для частичного снятия механических напряжений и насыщения кислородом. На завершающем этапе проводилась механическая полировка.

Выбранная технология уже была использована нами ранее для получения генерационных Nd:YAG-керамик и подробно представлена в работах [16, 17].

### 2.2. Исследование генерационных свойств керамики

На рис. 1 приведена фотография спечённой 1% Ho:YAG-керамики после атмосферного отжига и полировки. С помощью оптического микроскопа OLYMPUS BX51TRF-5

С.Н.Багаев, С.М.Ватник, И.А.Ведин, П.Ф.Курбатов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: bagayev@laser.nsc.ru

В.В.Осипов, В.А.Шитов, Р.Н.Максимов, К.Е.Лукьяшин. Институт электрофизики УрО РАН, Россия, 620016 Екатеринбург, ул. Амурдсена, 106;

e-mail: osipov@iep.uran.ru, vlad@iep.uran.ru, kostya@iep.uran.ru

А.А.Павлюк. Институт неорганической химии им. А.В.Николаева СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 3

Поступила в редакцию 26 июня 2014 г., после доработки – 21 августа 2014 г.

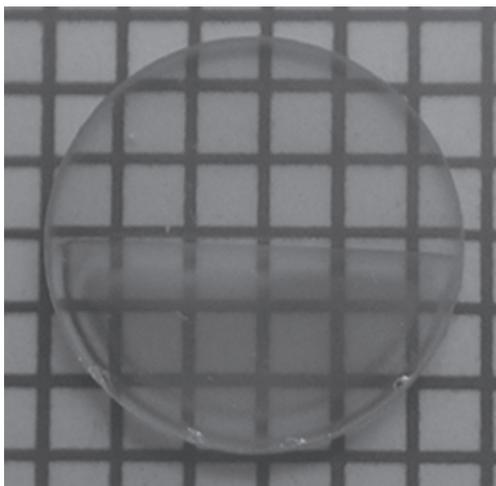


Рис.1. Фотография керамики 1% Ho:YAG с частичным просветляющим покрытием.

был оценён средний размер кристаллитов, равный 14 мкм, а также объёмная доля рассеивающих центров, составившая 30 ppm.

Для исследования генерационных свойств был выбран образец керамики 1% Ho:YAG № 1083 размером  $\varnothing 11 \times 1$  мм, спектр его пропускания изображён на рис.2. В связи с тем, что оптическая плотность образца даже в максимуме поглощения сравнительно невелика (поглощение на длине волны 1907 нм составляет около 15%), для накачки образца использовалась внутрирезонаторная схема, изображённая на вставке рис.2. В данном случае резонатор образован плотным зеркалом на поверхности кристалла двойного калий-лютециевого вольфрамата 5% Tm:KLuW толщиной 250 мкм [18] и частично пропускающим зеркалом ( $T_{out} = 0.6\%$  в диапазоне 1.85–2.1 мкм) на внешней поверхности керамики. Все оптические поверхности внутри резонатора просветлены на спектральный диапазон 1.85–2.1 мкм (с остаточными потерями для каждого покрытия не более 0.1% в области 1.85 мкм и  $\sim 0.5\%$  в области 2.1 мкм). Линза из плавнено-

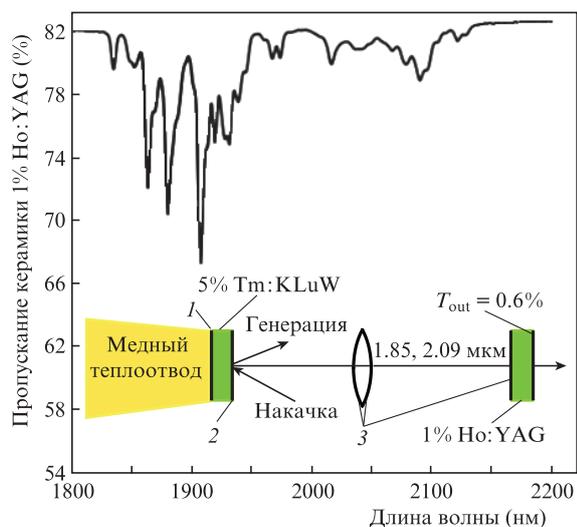


Рис.2. Спектр пропускания образца оптической керамики 1% Ho:YAG толщиной 1.0 мм. На вставке дана схема эксперимента: 1 – плотное дихроичное зеркало с коэффициентом отражения  $R > 99.9\%$  в диапазоне 1.85–2.1 мкм и на  $\lambda = 0.8$  мкм; 2, 3 – просветляющие покрытия в указанном диапазоне.

го кварца КИ с фокусным расстоянием 18 мм устанавливалась на одинаковом расстоянии от керамики и дискового элемента, физическая длина резонатора составила 50 мм. Накачка дискового активного элемента 5% Tm:KLuW осуществлялась коллимированным излучением двух линеек лазерных диодов (длина волны  $\lambda_p = 806$  нм), как в работе [19]; диаметр пятна накачки был равен 0.95 мм. Для уменьшения тепловых потоков все измерения проводились в квазинепрерывном режиме со скважностью 14%, длительность импульсов тока накачки линеек составила 7 мс, период повторения – 50 мс. Во всех случаях поглощённая мощность диодной накачки определялась как разность между прошедшей и падающей, оптические мощности световых потоков (накачка, генерация) регистрировались измерителем мощности Ophir L30A. Спектры генерации измерялись с помощью монохроматора МДР-204, фотосопротивления ФР-185 и селективного нановольтметра Unipan-233 в качестве предусилителя; спектральное разрешение (FWHM) составило  $\sim 0.5$  нм.

### 3. Результаты и их обсуждение

Зависимости средней выходной мощности генерации от средней поглощённой мощности накачки для описанной выше геометрии резонатора представлены на рис.3. Кривая 1 получена для оптической керамики 1% Ho:YAG с диэлектрическими покрытиями и характеризует мощность излучения с длинами волн 1.85 и 2.09 мкм. Кривая 4 соответствует мощности излучения с  $\lambda = 1.85$  мкм (получена при замене керамики на плоское диэлектрическое зеркало с пропусканием 0.6%). Кривые 2 и 3 соответствуют мощностям на указанных длинах волн, полученным пересчётом относительных интенсивностей спектров генерации согласно данным рис.4.

Начиная с некоторой пороговой мощности накачки ( $\sim 1.0$  Вт согласно рис.3, 4), в резонаторе одновременно возбуждаются два световых поля, соответствующие пере-

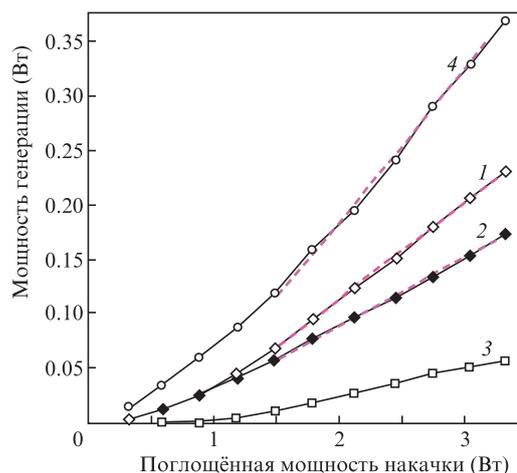


Рис.3. Зависимости выходной мощности генерации от поглощённой мощности накачки:

1 – для оптической керамики 1% Ho:YAG и излучения с  $\lambda = 1.85$  и 2.09 мкм; 2 и 3 – для той же керамики и излучения с  $\lambda = 1.85$  и 2.09 мкм соответственно, пересчитанные из кривой 1 с учётом относительных спектральных интенсивностей (см. рис.4); 4 – при замене керамики на диэлектрическое плоское зеркало с пропусканием  $T_{out} = 0.6\%$  для излучения с  $\lambda = 1.85$  мкм. Штриховые кривые на 1, 2 и 4 – линейные аппроксимации соответствующих зависимостей для определения дифференциальной эффективности  $\eta_{exp}$ .

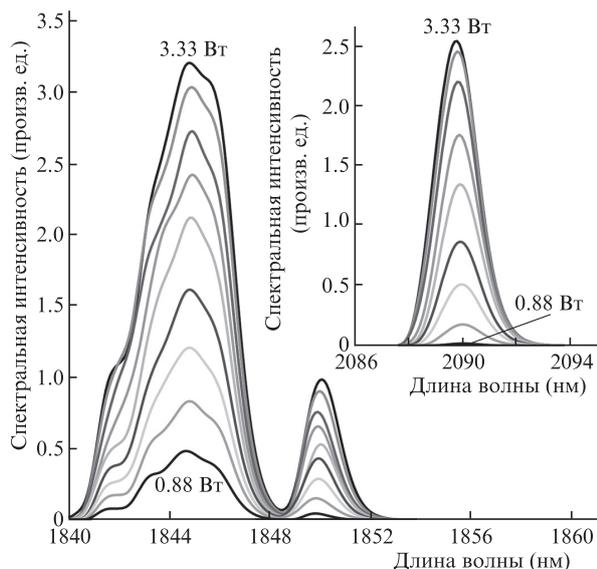


Рис.4. Спектральные интенсивности генерации для поглощённой мощности накачки 0.88, 1.19, 1.49, 1.79, 2.13, 2.45, 2.75, 3.05 и 3.33 Вт.

ходам  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  в матрице KLuW и  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  ионов  $Ho^{3+}$  в матрице YAG. На длине волны 1.85 мкм поглощение керамики 1% Ho:YAG (за два прохода) составляет 3.0% в режиме ненасыщенного поглощения, в режиме генерации с учётом инверсии  $\sim 20\%$  [14] (см. рис.3, 4) поглощение  $T_{abs} = 2.4\%$ . Таким образом, совокупные потери в резонаторе с керамикой 1% Ho:YAG  $T_{tot} = T_{abs} + T_{out} + T_{loss}$ , где  $T_{loss}$  – паразитные потери в резонаторе (за обход) на поглощение и рассеяние, отнесённые к длине волны 1.85 мкм. При замене керамики на выходное зеркало с пропусканием  $T_{out}$  поглощение отсутствует, т.е.  $T_{abs} = 0$ . В соответствии с общими соотношениями [20] экспериментально определяемая дифференциальная эффективность  $\eta_{exp}$  может быть записана в виде

$$\eta_{exp} = \eta T_{out} / (T_{abs} + T_{out} + T_{loss}), \quad (1)$$

где  $\eta$  – «предельная» дифференциальная эффективность генерации для идеального резонатора без потерь. Применяя (1) к зависимостям 4 и 2 на рис.3, получаем соотношение

$$(0.6\% + T_{loss}) / (3.0\% + T_{loss}) = 6.2\% / 14.0\% = 0.44 \quad (2)$$

(здесь 14.0% и 6.2% соответствуют дифференциальным эффективностям генерации для этих зависимостей). Таким образом, соотношения (1), (2) позволяют оценить  $T_{loss}$ , которые составляют  $\sim 1.2\%$  при  $\eta = 45\%$ , что находится в хорошем согласии с результатами работ [21, 22]. Оценка  $T_{loss} \approx 1.2\%$  выглядит также вполне правдоподобно в силу большого числа оптических поверхностей внутри резонатора. Согласно этим оценкам поглощённая керамикой световая мощность в пять раз превышает выходную мощность генерации, соответствующую кривой 2 на рис.3.

С другой стороны, совокупные потери на длине волны 2.09 мкм на просветляющих покрытиях составляют около 3% (по нашим оценкам  $T_{loss}(2.09) = 3.0\% \pm 1\%$ ), т.е. внутрирезонаторные потери примерно в пять раз превышают коэффициент пропускания выходного зеркала,  $T_{out}(2.09) = 0.6\%$ . Таким образом, из сравнения кривых 2 и 3, с учётом (1), можно получить оценку «предельной» дифференциальной эффективности генерации керамики

1% Ho:YAG на переходе  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  при внутрирезонаторной накачке по отношению к поглощённой мощности на длине волны 1.85 мкм:  $\eta = 40\% \pm 10\%$ . Эта величина примерно вдвое меньше аналогичного параметра для кристаллов Ho:YAG [8, 14], что может быть связано с наличием возможных структурных микродефектов в керамике.

Необходимо отметить, что в ряде работ были исследованы параметры генерации гольмиевых кристаллов при внутрирезонаторной накачке излучением тулиевых лазеров, при этом дифференциальная эффективность генерации (по отношению к поглощённой мощности диодной накачки) составила от  $\sim 20\%$  [23] до  $\sim 40\%$  [24]. В настоящей работе для исследуемого образца керамики 1% Ho:YAG этот параметр оказался равным 2.6% (кривая 3 на рис.3), что объясняется прежде всего значительным превышением уровня внутрирезонаторных потерь над пропусканием выходного зеркала. В этой связи для дальнейшего повышения эффективности и выходной мощности генерации необходима дальнейшая оптимизация параметров резонатора.

#### 4. Заключение

В работе исследованы генерационные характеристики керамики 1% Ho:YAG в условиях внутрирезонаторной накачки излучением дискового элемента 5% Tm:KLuW на длине волны 1.85 мкм. Показано, что дифференциальная эффективность генерации на длине волны 2.09 мкм относительно мощности накачки на  $\lambda = 1.85$  мкм составляет  $40\% \pm 10\%$ . Сделаны оценки эффективности генерации и внутрирезонаторных потерь. Предложенная схема резонатора может быть успешно использована для создания многоцветных источников излучения двухмикронного диапазона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» (проекты 6.2 и 6.6) и РФФИ (грант № 14-08-00181).

1. Fischer C., Sorokin E., et al. *Opt. Lasers Eng.*, **43**, 573 (2005).
2. Wang L., Gao C., Gao M., et al. *Opt. Eng.*, **53** (6), 061603 (2013).
3. Mizutani K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7153**, 71530J-1-8 (2008).
4. Godart A. *Physique*, **8**, 1100 (2007).
5. Gibert F., Flamant P.H., Bruneau D., et al. *Appl. Opt.*, **45**, 4448 (2006).
6. Budni P. A., Pomeranz L. A., et al. *J. Opt. Soc. Am.*, **17**, 723 (2000).
7. Lippert E., Fonnun H., et al. *Opt. Express*, **18**, 26475 (2010).
8. Naakestad M. W., Fonnun H., Arisholm G., et al. *Opt. Express*, **18**, 25379 (2010).
9. Qi Y., Zhu X., Lou Q., Ji J., et al. *Opt. Express*, **13** (22), 8725 (2005).
10. Taira T. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13** (3), 798 (2007).
11. Cheng X.J., Xu J.Q., Wang M.J., et al. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 351 (2010).
12. Yang H., Zhang J., Qin X., et al. *J. Am. Cer. Soc.*, **52**, 95 (2012).
13. Wang L., Gao C., Gao M., et al. *Opt. Express*, **22**, 254 (2014).
14. Lippert E., Nicolas S., Arisholm G., et al. *Appl. Opt.*, **45**, 3839 (2006).
15. Osipov V.V., Kotov Yu. A., et al. *Laser Phys.*, **16** (1), 116 (2006).
16. Bagayev S.N., Osipov V.V., et al. *Opt. Mater.*, **34**, 1482 (2012).
17. Багаев С.Н., Осипов В.В., Шитов В.А. и др. *Оптика атмосферы и океана*, **25** (3), 210 (2012).
18. Ватник С.М., Ведин И.А., Курбатов П.Ф., Павлюк А.А. *Квантовая электроника*, **44** (11), 989 (2014).
19. Ватник С.М., Осипов В.В., Ведин И.А., Курбатов П.Ф. *Квантовая электроника*, **43** (3), 288 (2014).
20. Svelto O. *Principles of Lasers* (Heidelberg: Springer, 2010).
21. Vatik S.M., Vedin I.A., et al. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 435 (2010).
22. Vatik S.M., Vedin I.A., Segura M., et al. *Opt. Lett.*, **37**, 356 (2012).
23. Stoneman R.C., Esterowitz L. *Opt. Lett.*, **17**, 736 (1992).
24. Schellhorn M., Hirth A., Kieleck C. *Opt. Lett.*, **28**, 1933 (2003).