

# Непрерывная генерация лазерного излучения мощностью 80 Вт в Yb:YAG-керамике

И.Л.Снетков, О.В.Палашов, В.В.Осипов, И.Б.Мухин,  
Р.Н.Максимов, В.А.Шитов, К.Е.Лукьяшин

*Сообщается о генерации непрерывного лазерного излучения на длине волны 1030 нм с максимальной мощностью 80 Вт и дифференциальной эффективностью 26% в тонком дисковом элементе из отечественной керамики – алюмоиттриевого граната, активированного ионами иттербия ( $(Yb_{0,05}Y_{0,95})_3Al_5O_{12}$ ). Исследуемый керамический образец изготавливался посредством твердофазного спекания смеси нанопорошков  $(Yb_{0,05}Y_{0,95})_2O_3$  и  $Al_2O_3$ , синтезированных методом лазерной абляции. Приведены результаты измерения генерационных характеристик в непрерывном и импульсно-периодическом режимах работы лазера.*

**Ключевые слова:** Yb:YAG-керамика, алюмоиттриевый гранат, лазерная генерация.

## 1. Введение

Разработка твердотельных квантовых генераторов с высокими средней и пиковой мощностями является одним из перспективных направлений лазеростроения. Это связано с широкой областью применения такого рода источников излучения в промышленности (сварка, резка, сверление, обработка материалов, 3D печать сложных металлических изделий), а также с использованием их для различных научных и медицинских целей. Одним из факторов, ограничивающих увеличение средней мощности этих лазеров, являются тепловые эффекты, которые возникают в активных элементах лазера из-за стоковых потерь, поглощения излучения примесями или дефектами материала, вследствие различных нелинейных тепловых процессов и т. п. Тепловыделение в оптических элементах пагубно влияет на модовый состав проходящего излучения и на эффективность лазерной генерации и усиления. Для ослабления влияния тепловых эффектов и продвижения в область больших мощностей используются: диодная накачка, согласованная со спектром поглощения активного иона; активные ионы с малыми стоковыми потерями (малым дефектом кванта); материалы с оптимальными термооптическими и механическими характеристиками, позволяющими при прочих равных условиях минимизировать возникающие тепловые эффекты; геометрия и способ охлаждения активного элемента для уменьшения его средней температуры.

Одним из распространенных решений для получения лазерного излучения с высокой средней мощностью явля-

ется использование дисковых активных элементов на основе алюминатов иттрия или лютеция с кристаллической структурой граната, активированных ионами иттербия ( $Yb_{3x}Y(Lu)_{3-3x}Al_5O_{12}$ , Yb:Y(Lu)AG) [1, 2]. Это связано с тем, что данные материалы обладают хорошими спектральными, оптическими и механическими свойствами, технологичны и достаточно хорошо исследованы. Кроме того, ион  $Yb^{3+}$  имеет трехуровневую систему энергетических уровней и малый дефект кванта, что обуславливает относительно малое тепловыделение в процессе лазерной генерации, причем данный активатор обладает довольно большими сечениями поглощения и усиления и достаточной для генерации субпикосекундных импульсов шириной спектра излучения. На сегодняшний день с использованием одного активного элемента из монокристалла  $Yb^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$  реализован дисковый лазер с 44 проходящими излучения накачки на  $\lambda = 940$  нм, генерирующий с эффективностью более 50% излучение высокого качества со средней мощностью  $\sim 10$  кВт [1].

В то же время в последние годы особую актуальность приобретают исследования, направленные на разработку мощных твердотельных лазеров с керамической активной средой, что объясняется рядом преимуществ оптической керамики перед монокристаллами аналогичного состава. Это потенциально большие размеры, быстрота производства, меньшие энергозатраты и стоимость, возможность обеспечения повышенной концентрации активных центров и их градиентного распределения [3, 4]. В этом плане следует отметить успехи зарубежных исследователей, достигших для дисковых керамических лазеров на основе  $Yb^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$  и  $Yb^{3+}:Lu_3Al_5O_{12}$  выходной мощности более 5 кВт [5, 6].

В России изготовление керамических активных элементов высокого оптического качества, пригодных для осуществления лазерной генерации, налажено в нескольких организациях, включая Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН (Фрязино) [7], Институт химии высококачественных веществ им. Г.Г.Десятых РАН (Нижний Новгород) [8, 9], Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН (Москва) [10, 11], Институт электрофизики УрО РАН (Екате-

И.Л.Снетков, О.В.Палашов, И.Б.Мухин. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: snetkov@appl.sci-nnov.ru  
В.В.Осипов, В.А.Шитов, К.Е.Лукьяшин. Институт электрофизики УрО РАН, Россия, 620016 Екатеринбург, ул. Амундсена, 106  
Р.Н.Максимов. Институт электрофизики УрО РАН, Россия, 620016 Екатеринбург, ул. Амундсена, 106; Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

ринбург) [12, 13]. Отличительная особенность настоящей работы, которая является продолжением исследований генерационных характеристик Yb:YAG-керамики в виде тонкого диска [13], главным образом заключается в использовании алмазного теплоотвода для более эффективного охлаждения активной среды, что позволило на порядок повысить мощность генерируемого излучения благодаря увеличению диаметра пятна излучения накачки.

## 2. Изготовление керамического элемента

Исследуемый образец лазерной Yb:YAG-керамики был изготовлен в Институте электрофизики УрО РАН посредством твердофазного спекания нанопорошков с дополнительным обжигом смеси оксидов перед компактированием. Исходными материалами служили наноразмерные частицы  $Yb_{0.1}Y_{1.9}O_3$  и  $Al_2O_3$ , синтезированные методом лазерной абляции [14, 15]. Полученные нанопорошки прокаливались на воздухе при температуре 900–1200 °С в течение трех часов для обеспечения преобразования метастабильной структуры частиц в основную кубическую фазу и достижения точного стехиометрического соотношения ( $Yb_{0.15}Y_{2.85}Al_5O_{12}$ ) при взвешивании. Смешивание нанопорошков оксидов производилось в среде этилового спирта с использованием 0.5 масс.% тетраэтоксисилана в качестве спекающей добавки. Полученная смесь высушивалась в помощью вакуумного ротационного испарителя, прокаливалась на воздухе при температуре 1200 °С в течение трех часов для удаления органических соединений и осуществления частичного фазового превращения структуры частиц в структуру граната и затем под давлением 200 МПа компактировалась в заготовку цилиндрической формы диаметром 14 мм и толщиной 3–4 мм. Спекание компакта производилось при температуре 1780 °С в течение 20 часов при остаточном давлении газов  $\sim 10^{-3}$  Па. После спекания керамический образец подвергался просветляющему обжигу на воздухе при 1300 °С в течение 10 часов и полировке с использованием алмазных паст разной зернистости.

На рис.1 представлены спектры пропускания образца синтезированной Yb:YAG-керамики толщиной 2 мм, полученные с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-1700 непосредственно после спекания, а также после просветляющего обжига. В длинноволновой (860–1070 нм)

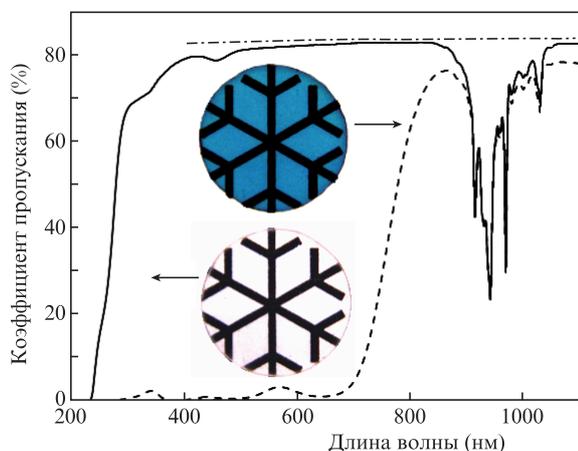


Рис.1. Спектры пропускания и фотографии образца Yb:YAG-керамики до (вверху) и после (внизу) просветляющего обжига. Штрихпунктирная линия соответствует теоретической кривой пропускания YAG.

области обоих спектров присутствует одинаковая структурированная полоса поглощения, формируемая ионами  $Yb^{3+}$ . В видимой и УФ областях спектра непрокаленной керамики наблюдаются три широкие полосы поглощения на  $\lambda = 640, 385$  и  $280$  нм, обусловленные присутствием в кристаллической решетке двухвалентных ионов иттербия [16]. Эти полосы полностью исчезают после просветляющего обжига образца на воздухе; в то же время после данной процедуры проявляются дополнительная полоса в области  $\lambda = 450$  нм и перегиб при  $340$  нм, обусловленные, по-видимому, присутствием в образце незначительного количества ионов  $Ce^{3+}$  [17]. Теоретическая кривая пропускания для YAG (штрихпунктирная линия) рассчитана по известным значениям показателя преломления. Коэффициент пропускания синтезированной керамики после просветляющего обжига достигает 82.6% в ближней ИК области, что примерно на 1% меньше теоретического значения.

## 3. Генерация лазерного излучения

Для проведения лазерного эксперимента и реализации дискового лазера толщина керамического образца была уменьшена до 300 мкм. На торцы образца были нанесены диэлектрические покрытия (просветляющее с одной стороны и отражающие с другой) на длины волн излучения накачки и генерации 940 и 1030 нм соответственно). Полученный активный элемент монтировался на алмазный теплоотвод, который устанавливался в квантрон с водяным охлаждением [18]. Квантрон помещался в лазерный резонатор, образованный задним торцом активного элемента и двумя диэлектрическими зеркалами: сферическим (радиус кривизны 120 см) с отражением  $\sim 100\%$  на  $\lambda = 1030$  нм и плоским выходным зеркалом. В качестве выходного использовалось зеркало с коэффициентом отражения 90% на  $\lambda = 1030$  нм. Источником накачки являлся диодный лазер с волоконным выходом Laserline LDM 2000, излучающий на  $\lambda = 940$  нм. Было организовано 10 V-образных проходов накачки излучения через активный элемент. Лазерная генерация на  $\lambda = 1030$  нм была получена как в импульсно-периодическом (длительность импульсов накачки 3 мс, частота их следования 10 Гц), так и в непрерывном режиме при диаметрах пятна излучения накачки 3.5 и 5 мм. В процессе генерации регистрировалась температура активного элемента в области пятна излучения накачки. При достижении температуры 120 °С увеличение мощности излучения накачки прекращалось во избежание отсоединения активного элемента от теплоотвода и последующего его разрушения. В импульсно-периодическом режиме температура активного элемента не изменялась во всем диапазоне мощности излучения накачки. Результаты эксперимента представлены на рис.2.

В импульсно-периодическом режиме, когда тепловыми эффектами можно пренебречь, дифференциальная эффективность генерации составила 36% и 33.5% для пучков излучения накачки диаметрами 3.5 и 5 мм соответственно. В непрерывном режиме дифференциальная эффективность генерации составила 28% и 26%, а максимальные средние мощности достигли 66 и 80 Вт соответственно. Данные значения мощности на порядок превышают полученные нами в работе [11]. Это было достигнуто в результате увеличения диаметра пятна накачки в 1.75–2.5 раза, которое не приводило к деградации генерационных характеристик благодаря однородности ке-

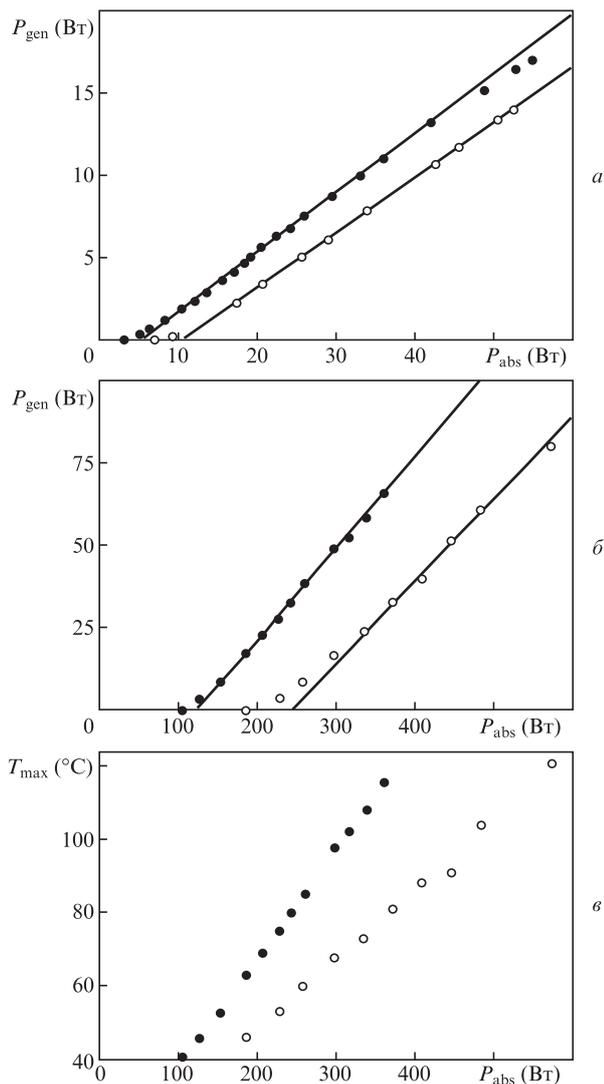


Рис.2. Зависимости средней мощности лазерной генерации в импульсно-периодическом (а) и непрерывном (б) режимах, а также максимальной температуры активного элемента в непрерывном режиме (в) от средней мощности поглощенного излучения накачки при диаметрах пучков излучения накачки 3.5 (●) и 5 мм (○).

рамы и организации более эффективного охлаждения активного элемента за счет использования алмаза в качестве теплоотводящего материала. Таким образом, разработанные методики изготовления Yb:YAG-керамики и ее монтажа на алмазный теплоотвод дают возможность масштабировать активные элементы дисковых лазеров и получать более высокие средние мощности излучения, что важно для практических и научных применений.

В работе исследованы генерационные характеристики отечественной керамики Yb:YAG, изготовленной посредством твердофазного реакционного спекания нанопорошков, синтезированных методом лазерной абляции, с применением дополнительного обжига смеси оксидов

перед компактированием. Коэффициент пропускания образца толщиной 2 мм достигал 82.6% в ближней ИК области спектра, что на ~1% меньше теоретического значения. Впервые с использованием отечественной керамики продемонстрирована непрерывная генерация лазерного излучения мощностью 80 Вт на длине волны 1030 нм с дифференциальной эффективностью 26% благодаря использованию алмазного теплоотвода и увеличению диаметра пятна излучения накачки до 5 мм.

Исследования по изготовлению и оптической характеристике образца Yb:YAG-керамики выполнялись при поддержке проекта УРО РАН № 18-10-2-38. Изготовление активного элемента из Yb:YAG-керамики и исследование его лазерных и генерационных характеристик выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-12-00416).

- Schad S.-S., Gottwald T., Kuhn V., Ackermann M., Bauer D., Scharun M., Killi A. *Proc. SPIE*, **9726**, 972615 (2016).
- Beil K., Fredrich-Thornton S.T., Tellkamp F., Peters R., Kränkel C., Petermann K., Huber G. *Opt. Express*, **18**, 20712 (2010).
- Lu J., Prabhu M., Song J., Li C., Xu J., Ueda K., Kaminskii A.A., Yagi H., Yanagitani T. *Appl. Phys. B*, **71**, 469 (2000).
- Ikesue A., Aung Y.L. *Nat. Photon.*, **2**, 721 (2008).
- Latham W.P., Lobad A., Newell T.C., Stalnakar D. *Proc. AIP Conf.*, **1278**, 758 (2010).
- Peng Y.H., Cheng J., Lai K.S., Lau E., Ang S.K., in *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR)* (Singapore, 2017, p. 1).
- Kaminskii A.A., Balashov V.V., Cheshev E.A., Kopylov Y.L., Koromysov A.L., Krokhin O.N., Kravchenko V.B., Lopukhin K.V., Shemet V.V. *Opt. Mater.*, **71**, 103 (2017).
- Снетков И.Л., Мухин И.Б., Балабанов С.С., Пермин Д.А., Палашов О.В. *Квантовая электроника*, **45**, 95 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 95 (2015)].
- Снетков И.Л., Мухин И.Б., Палашов О.В. *Квантовая электроника*, **46**, 193 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 193 (2016)].
- Рябочкина П.А., Ляпин А.А., Осико В.В., Федоров П.П., Ушаков С.Н., Круглова М.В., Сахаров Н.В., Гарибин Е.А., Гусев П.Е., Крутов М.А. *Квантовая электроника*, **42**, 853 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 853 (2012)].
- Doroshenko M.E., Demidenko A.A., Fedorov P.P., Garibin E.A., Gusev P.E., Jelinkova H., Konyshkin V.A., Krutov M.A., Kuznetsov S.V., Osiko V.V., Popov P.A., Shulc J. *Phys. Stat. Sol.*, **10**, 952 (2013).
- Багаев С.Н., Осипов В.В., Ватник С.М., Шитов В.А., Штейнберг И.Ш., Ведин И.А., Курбатов П.Ф., Лукьяшин К.Е., Максимов Р.Н., Соломонов В.И., Твердохлеб П.Е. *Квантовая электроника*, **45**, 492 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 492 (2015)].
- Снетков И.Л., Палашов О.В., Осипов В.В., Мухин И.Б., Максимов Р.Н., Шитов В.А., Лукьяшин К.Е. *Квантовая электроника*, **46**, 586 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 586 (2016)].
- Osipov V.V., Kotov Y.A., Ivanov M.G., Samatov O.M., Lisenkov V.V., Platonov V.V., Murzakaev A.M., Medvedev A.I., Azarkevich E.I. *Laser Phys.*, **16**, 116 (2006).
- Osipov V.V., Platonov V.V., Lisenkov V.V., Podkin A.V., Zakharova E.E. *Phys. Stat. Sol. C*, **10**, 926 (2013).
- Solomonov V., Osipov V., Spirina A. *J. Lumin.*, **169**, 151 (2016).
- Osipov V.V., Ishchenko A.V., Shitov V.A., Maksimov R.N., Lukyashin K.E., Platonov V.V., Orlov A.N., Osipov S.N., Yagodin V.V., Viktorov L.V., Shulgin B.V. *Opt. Mater.*, **71**, 98 (2017).
- Kuznetsov I.I., Mukhin I.B., Palashov O.V. *Laser Phys.*, **26**, 045004 (2016).