

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})₃Al₅O₁₂). Исследуемый керамический образец изготавливался посредством твердофазного спекания смеси нанопорошков (Yb_{0,05}Y_{0,95})₂O₃ и Al₂O₃, 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}Al₅O₁₂, 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 Yb³⁺ 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 Yb³⁺:Y₃Al₅O₁₂ реализован дисковый лазер с 44 проходящими излучения накачки на $\lambda = 940$ нм, генерирующий с эффективностью более 50% излучение высокого качества со средней мощностью ~ 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 Yb³⁺:Y₃Al₅O₁₂ и Yb³⁺:Lu₃Al₅O₁₂ 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. Амурдсена, 106
Р.Н.Максимов. Институт электрофизики УрО РАН, Россия, 620016 Екатеринбург, ул. Амурдсена, 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)

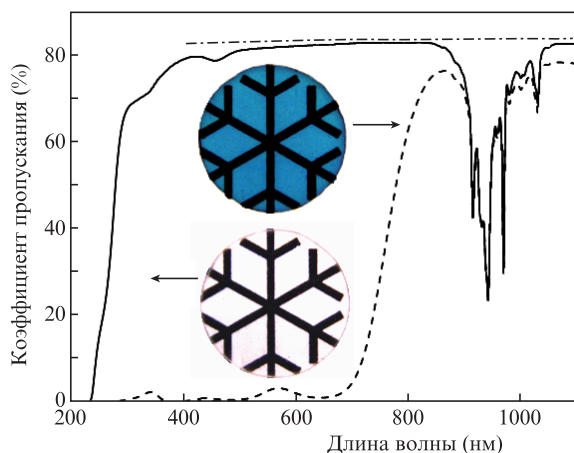


Рис.1. Спектры пропускания и фотографии образца Yb:YAG-керамики до (вверху) и после (внизу) просветляющего обжига. Штрихпунктирная линия соответствует теоретической кривой пропускания YAG.

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-

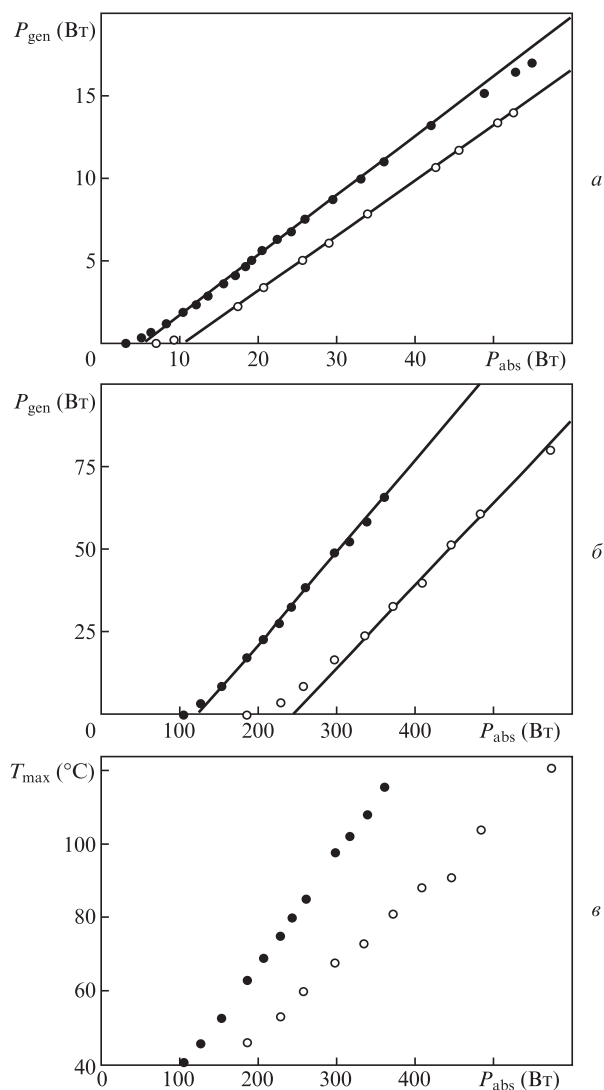


Рис.2. Зависимости средней мощности лазерной генерации в импульсно-периодическом (а) и непрерывном (б) режимах, а также максимальной температуры активного элемента в непрерывном режиме (в) от средней мощности поглощенного излучения накачки при диаметрах пучков излучения накачки 3.5 (●) и 5 мм (○).

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 N., 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).