

Мультиваттная генерация лазерных керамик, содержащих 0.8% и 1% Nd:YAG

С.М.Ватник, В.В.Осипов, К.Е.Лукьяшин, В.Б.Кравченко, Ю.Л.Копылов, И.А.Ведин, П.Ф.Курбатов

Исследованы генерационные характеристики образцов лазерных керамик 1% Nd:YAG и 0.8% Nd:YAG, синтезированных соответственно в Институте электрофизики УрО РАН и во Фрязинском филиале Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН. На всех образцах получена лазерная генерация с дифференциальной эффективностью от 7% до 25%, максимальная выходная мощность составила свыше 4 Вт. Приведены оценки «внутренних» потерь керамик на поглощение и рассеяние.

Ключевые слова: лазерная керамика Nd:YAG, диодная накачка, эффективность генерации, спектры пропускания.

1. Введение

Значительный прогресс в синтезе лазерных оксидных керамик в последние годы позволил, в частности, получить на базе отечественных технологий прессования и спекания [1, 2] крупногабаритные образцы керамик Nd:YAG (до 50 мм в диаметре) со сравнительно малыми «внутренними» потерями и остаточной пористостью [3, 4]. Вместе с тем, достигнутый уровень микроструктурной однородности отечественных керамик несколько уступает показателям лучших зарубежных образцов, что неизбежно сказывается на параметрах генерации, в том числе дифференциальной эффективности и пороговой мощности накачки. В этой связи значительный интерес представляют исследования параметров генерации образцов керамик, полученных с помощью различных методик синтеза. В настоящей работе представлены результаты измерений генерационных характеристик лазерных керамик Nd:YAG, синтезированных в Институте электрофизики УрО РАН (ИЭФ УрО РАН) и Фрязинском филиале Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН (ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН); методы синтеза исходной нанокристаллической шихты и технологических процессов спекания подробно изложены в [1–6]. Проведенные исследования направлены на решение части комплексной задачи по сквозной оптимизации параметров синтеза керамик с целью дальнейшего улучшения их оптических характеристик и микроструктурной однородности, которая составляет важное направление в

рамках научно-практических задач, связанных с созданием высокоэффективных лазерных сред, в том числе активных элементов для лазерных систем мультикиловаттного класса.

2. Экспериментальная часть

Представленные для исследований образцы оптических керамик Nd:YAG представляли собой диски $\varnothing 16 \times 3.1$ мм (ФИРЭ, образцы № 8 и 10), а также $\varnothing 11 \times 1.1$ мм и $\varnothing 47 \times 2.1$ мм (ИЭФ, образцы № 408, 414, 418 и Б2). После измерения коэффициентов пропускания образцов на спектрофотометре Shimadzu UV-3101PC в спектральном диапазоне 800–1100 нм на поверхности дисков были нанесены диэлектрические покрытия: на первую – широкополосное просветляющее с остаточным отражением $R < 0.15\%$ на длинах волн накачки (808 нм) и генерации (1064 нм), на вторую – комбинированное отражающее, состоящее из диэлектрического плотного зеркала ($R > 99.8\%$ при $\lambda = 1064$ нм) и дополнительного слоя металлизации, обеспечивающего высокий коэффициент отражения накачки при углах падения 0–30°. Для эффективного отвода тепла керамические диски устанавливались на медные теплоотводы через промежуточный слой индиевой фольги толщиной 100 мкм с использованием различных методов пайки и обжима.

Накачка образцов керамик 1% Nd:YAG № 408, 414, 418 (ИЭФ) осуществлялась линейкой лазерных диодов с оптической мощностью до 30 Вт на длине волны 808 нм, излучение которой фокусировалось на активный элемент при помощи двухзеркального коллиматора и вспомогательной оптики [7], что обеспечило приблизительно круглую форму пятна в фокусе диаметром ~ 0.7 мм, при этом потери мощности во всем оптическом тракте не превышали 10%. Накачка керамик Б2 (1% Nd:YAG, ИЭФ) и № 8, 10 (0.8% Nd:YAG, ФИРЭ) осуществлялась двумя диодными линейками с совокупной мощностью до 50 Вт, диаметр пятна накачки в фокусе был 0.95 мм.

Все генерационные эксперименты проведены в геометрии короткого линейного резонатора с физической длиной $L = 20$ мм, который был образован внешним вогнутым зеркалом и плотным зеркалом на активном элементе

С.М.Ватник, И.А.Ведин, П.Ф.Курбатов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: vatnik@laser.nsc.ru, vedin@laser.nsc.ru
В.В.Осипов, К.Е.Лукьяшин. Институт электрофизики УрО РАН, Россия, 620016 Екатеринбург, ул. Амурдсена, 106; e-mail: plasma@ier.uran.ru, vlad@ier.uran.ru
В.Б.Кравченко, Ю.Л.Копылов. Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1; e-mail: vbk219@ire216.msk.su, ylk215@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 3 марта 2014 г., после доработки – 18 апреля 2014 г.

со стороны теплоотода, как показано на рис.1 в работе [7]. В качестве выходного использовалось вогнутое сферическое зеркало с радиусом кривизны $r = -40$ мм и коэффициентом пропускания $T = 3\%$ на длине волны $\lambda = 1064$ нм. Мощности излучения накачки и генерации измерялись с помощью Ophir L30A. В целом, схема эксперимента достаточно близка к описанной в работе [7], за исключением некоторых технических усовершенствований, связанных с условиями термостабилизации диодных линеек и активных элементов.

3. Результаты и их обсуждение

Фотографии исследованных образцов лазерных керамик и спектры их пропускания в диапазоне 800–1100 нм представлены на рис.1. Как и ожидалось, максимумы по-

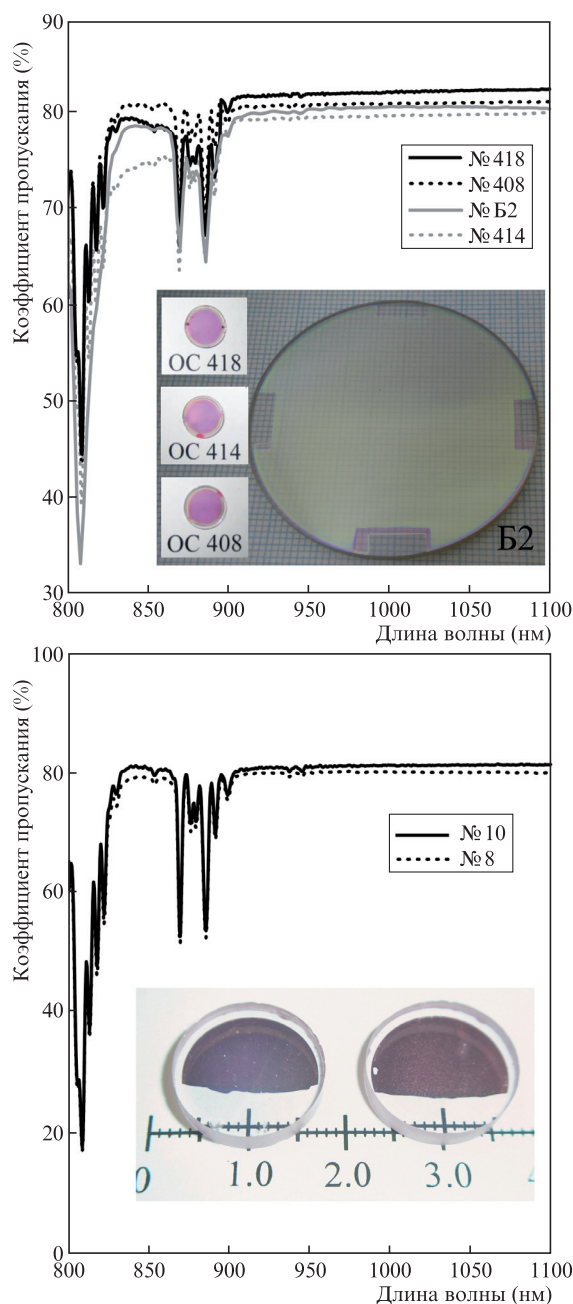


Рис.1. Спектры пропускания лазерных керамик 1% Nd:YAG (ИЭФ) (а) и 0.8% Nd:YAG (ФИРЭ) (б). На вставке приведены фотографии исследованных образцов.

глощения в ближней ИК области спектра центрированы на длине волны 808 нм, что является типичным для образцов иттрий-алюминиевых гранатов, активированных трехвалентным неодимом. Из сравнения величин пропускания керамик в области прозрачности (1000–1100 нм) T_{exp} и расчетного пропускания T_c оптического материала с показателем преломления $n = 1.815$ («идеальная» однородная керамика, в которой учтены только френелевские потери на отражение) можно найти абсолютные потери на поглощение и рассеяние $T_{\text{loss}} = T_c - T_{\text{exp}}$ (соответствующие данные отражены в табл.1).

Табл.1. Параметры генерации образцов оптической керамики Nd:YAG.

Номер образца	Порог генерации (Вт)	η_{opt} (%)	η_{dif} (%)	T_{loss} (%)
408	8.7	4.9	6.8	1.5
414	8.7	5.1	7.2	3.4
418	7.0	13.6	19.1	0.9
Б2	12.1	5.3	6.7	2.1
8	4.3	7.6	9.5	3.2
10	1.4	18.9	20.8	1.9

Примечание: Параметры указаны для падающей на активный элемент мощности накачки (см. рис.2) при коэффициенте пропускания выходного зеркала $T = 3\%$; η_{opt} – оптическая эффективность; η_{dif} – дифференциальная эффективность.

В ходе предварительных исследований генерационных характеристик образцов было установлено, что изменение физической длины резонатора в диапазоне 20–40 мм незначительно (в пределах 5%) влияет на выходную мощность генерации, а при увеличении длины более чем на 40 мм начинается резкое снижение мощности, обусловленное выходом резонатора из зоны устойчивости. Поэтому все генерационные эксперименты проводились при длине резонатора $L = 20$ мм, для которой выходная мощность генерации была наибольшей (20 мм – это минимальная длина, при которой пучок накачки не перекрывается выходным зеркалом). При таких параметрах резонатора диаметр гауссова пучка составляет 0.16 мм. Поскольку размер пятна пучка накачки был значительно больше (~ 1 мм), сравнение лазерных керамик проводилось по критерию максимальной выходной мощности и эффективности генерации, при этом модовый состав излучения не контролировался. На рис.2,а представлены результаты измерений генерационных характеристик образцов керамики 1% Nd:YAG №408, 414, 418 и Б2 для четырехпроходной схемы накачки, в которой возвратное зеркало обеспечивает дополнительные два прохода (см. рис.1 в [7]). В отсутствие возвратного отражателя в исследуемых образцах за два прохода поглощается 50% мощности накачки, соответственно для четырех проходов доля поглощенной накачки возрастает до 75%. Таким образом, дифференциальная и оптическая эффективности генерации лучшего из исследованных образцов керамики 1% Nd:YAG (№ 418, ИЭФ), пересчитанные на поглощенную мощность накачки, составляют 25.5% и 18.1%.

Результаты аналогичных генерационных экспериментов для оптических керамик 0.8% Nd:YAG (ФИРЭ) представлены на рис.2,б. Поскольку металлизация на плотном зеркале на этих образцах имела очень низкую адгезию, параметры генерации измерялись в режиме квазинепрерывной накачки со скважностью 14% (7 мс/50 мс)

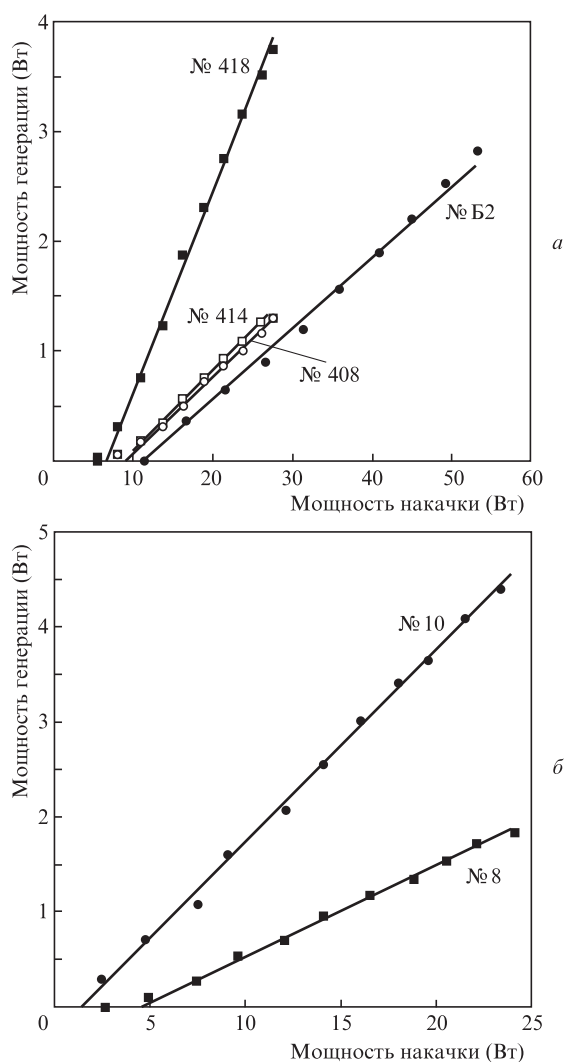


Рис.2. Зависимости выходной мощности генерации от мощности накачки для образцов № 408, 414, 418, Б2 (ИЭФ) (а) и № 8, 10 (ФИРЭ) (б).

при максимальной мощности накачки 25 Вт. Наилучшие параметры генерации получены для образца № 10, для которого в пересчете на поглощенную мощность ($\sim 90\%$ от падающей) дифференциальная и оптическая эффективности составили 23.1% и 21.0% соответственно. Основные результаты экспериментов представлены в табл.1.

Как уже отмечалось ранее [7], наблюдается определенное качественное соответствие между эффективностью генерации керамики и величиной потерь T_{loss} . Так, например, большие значения эффективности генерации соответствуют наивысшему светопропусканию (образцы № 418 и 10). Согласно данным табл.1 удельные величины потерь T_{loss}/H (H – толщина керамики) для этих образцов достаточно близки и составляют около 7%/см, при этом дифференциальная и полная эффективности генерации практически одинаковы. Таким образом, с учетом всей со-

вокупности представленных экспериментальных результатов, а также значительного изменения эффективности генерации от образца к образцу в настоящее время не представляется возможным сделать однозначный вывод о преимуществах какого-либо из разработанных методов синтеза керамик, описанных в [1, 2, 4–6].

Заметим, что образцы № 408 и 414, у которых величины потерь T_{loss} различаются более чем в два раза, показали идентичные параметры генерации – с очень близкими порогами и эффективностью (см. рис.1, а, 2, а и табл.1). По всей видимости, кроме величины оптических потерь на генерационные характеристики керамик влияет и степень микроструктурной оптической однородности, которая должна быть достаточной для обеспечения условий фазовой когерентности. В целом, для дальнейшего повышения эффективности генерации необходимо проводить сквозную оптимизацию всей технологической линии синтеза керамик с целью последующего уменьшения потерь на поглощение и рассеяние до уровня $10^{-3} - 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ [8, 9].

4. Заключение

Несмотря на значительный прогресс в улучшении функциональных характеристик российских лазерных керамик (включая синтез керамических дисков больших размеров), величина удельных потерь на поглощение и рассеяние не позволяет реализовать все преимущества керамических материалов в случае использования их в качестве активных элементов мощных лазерных систем. Так, согласно представленным результатам дифференциальная эффективность отечественных керамик Nd:YAG находится на уровне 25%, что примерно в два раза меньше, чем у лучших зарубежных аналогов. Поэтому дальнейшее улучшение оптической однородности лазерных керамик за счет снижения общего уровня потерь остается актуальной научно-технической задачей, имеющей приоритетное значение для разработки современных твердотельных лазерных систем мультикиловаттного класса.

Работа выполнена в рамках Программы Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» и Программы УрО РАН (проект №12-П-2-101).

1. Bagaev S.N., Osipov V.V., Shitov V.A., et al. *Atm. and Ocean. Opt.*, **25**, 292 (2012).
2. Багаев С.Н., Осипов В.В., Соломонов В.И. и др. *Перспективные материалы*, **4**, 18 (2012).
3. Осипов В.В., Хасанов О.Л., Шитов В.А. и др. *Российские нанотехнологии*, **3**, 98 (2008).
4. Bagaev S.N., Osipov V.V., Solomonov V.I., et al. *Opt. Mater.*, **34**, 1482 (2012).
5. Kaminskii A., Kravchenko V., Kopylov Yu., et al. *Phys. Stat. Sol. (a)*, **7**, 2411 (2007).
6. Багаев С.Н., Каминский А.А., Копылов Ю.Л. и др., *Квантовая электроника*, **43**, 271 (2013).
7. Ватник С.М., Осипов В.В., Ведин И.А. и др. *Квантовая электроника*, **43**, 288 (2013).
8. Li C., Liu W., Gao H., et al. *Appl. Phys. B*, **104**, 625 (2011).
9. Ikesue A., Aung Y. *J. Am. Ceram. Soc.*, **89**, 1936 (2006).