

Исследование генерационных характеристик лазерной керамики 1% Nd:YAG

С.М.Ватник, В.В.Осипов, И.А.Ведин, П.Ф.Курбатов

Исследованы генерационные характеристики образцов лазерных керамик 1%Nd:YAG, синтезированных в Институте электрофизики УрО РАН. Генерация в непрерывном режиме получена на всех образцах, дифференциальная и полная оптическая эффективности составили 25% и 18% соответственно. 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 области создания твердотельных лазеров в последние годы связан с разработкой и исследованием новых перспективных активных сред на основе лазерных нанокерамик, в том числе керамик иттрий-алюминиевого граната. Исследования генерационных и спектроскопических свойств оксидных лазерных керамик начались с 1990-х годов. В 1995 г. впервые была получена лазерная генерация на керамике 1% Nd:YAG [1], а уже к 2001 г. эффективности генерации керамик и монокристаллов Nd:YAG практически сравнялись [2]. По ряду параметров лазерная керамика по сравнению с монокристаллами обладает значительными преимуществами, к числу которых можно отнести относительную простоту синтеза образцов больших размеров, возможность изготовления многослойных (композитных) керамических структур, сравнительно низкую стоимость производства [3]. Все это обуславливает перспективы широкого использования высокопрозрачной керамики в твердотельных лазерных системах мульткиловаттного класса. В настоящей работе представлены результаты исследований генерационных характеристик образцов керамики 1% Nd:YAG, синтезированных в Институте электрофизики УрО РАН. Сравнительный анализ методик изготовления высокопрозрачной Nd:YAG-керамики из нанопорошков подробно представлен в работах [4–10, 12]. При этом, несмотря на значительный прогресс в методах и технологии производства, задача оптимизации параметров синтеза керамик с целью улучшения их микроструктурной однородности и оптических характеристик в значительной степени остается актуальной и является важным направлением в ряду научно-практических задач, связанных с созданием высокоэффективных лазерных сред.

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. Институт электрофизики УрО РАН, Россия, 620016 Екатеринбург, ул. Амундсена, 106; e-mail: plasma@iep.uran.ru.

Поступила в редакцию 24 декабря 2012 г.

2. Эксперимент

Эксперименты проводились на дисках из 1% Nd:YAG-керамики с плоскопараллельными полированными поверхностями. После измерения коэффициентов пропускания образцов на спектрофотометре Shimadzu UV-3101PC в спектральном диапазоне 800–1100 нм на поверхности дисков были нанесены диэлектрические покрытия: на одну сторону – широкополосное просветляющее покрытие с остаточным отражением $R < 0.15\%$ на длинах волн накачки (808 нм) и генерации (1064 нм), на другую – комбинированное отражающее покрытие, состоящее из диэлектрического плотного зеркала ($R > 99.8\%$ на $\lambda = 1064$ нм) и дополнительного слоя металлизации, обеспечивающего высокий коэффициент отражения излучения накачки при углах падения $0-30^\circ$. 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.

Все генерационные эксперименты были проведены в геометрии короткого линейного резонатора с физической длиной $L = 12$ мм, образованного внешним вогнутым зеркалом и плотным зеркалом на активном элементе со стороны теплоотвода (рис.1). В качестве выходных использовали сферические зеркала с коэффициентами пропускания $T_{\text{out}} = 3\%$ и 10% на длине волны $\lambda = 1064$ нм и с одним и тем же радиусом кривизны $r = -40$ мм. Накачка образцов 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 [11] и вспомогательной фокусирующей оптики, что обеспечивало приблизительно круглую форму пятна в фокусе диаметром ~ 0.7 мм; при этом потери мощности во всем фокусирующем тракте не превышали 10%. Для измерения оптической мощности накачки и генерации использовался Ophir L30A. Блок накачки и элементы лазерного резонатора были установлены на общем алюминиевом основании. Так как длина волны излучения диодной линейки существенно зависит от ее температуры, то температура корпуса линейки (тип CS) стабилизировалась таким образом, чтобы при каждом измерении поглощение оптиче-

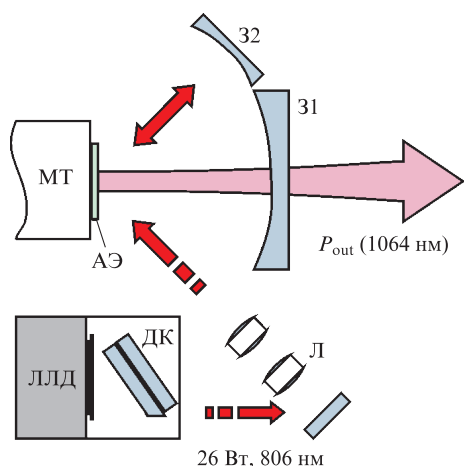


Рис.1. Схема экспериментальной установки для исследования генерационных характеристик 1% Nd:YAG-керамики: АЭ – активный элемент; МТ – медный теплоотвод; ЛЛД – линейка лазерных диодов (30 Вт, 808 нм); 31 – выходное сферическое зеркало ($T_{out} = 3\%$ или 10% , $r = -40$ мм); 32 – возвратное зеркало; Л – фокусирующая оптика; ДК – двухзеркальный коллиматор.

ской мощности накачки было максимальным. Во всех случаях изменение температуры корпуса линейки составило около 6° – от $\sim 27^\circ\text{C}$ при малых мощностях до 21°C при максимальной мощности излучения накачки (27.6 Вт). Температура теплоотвода дискового элемента (керамики) специально не контролировалась, но во всех режимах она не превышала 30°C .

3. Результаты и их обсуждение

Спектры пропускания исследованных образцов № 408, 414 и 418 лазерных керамик 1% Nd:YAG ($\varnothing 11 \times 1.1$ мм) и образца большого размера Б2 ($\varnothing 47 \times 2.1$ мм) в диапазоне 800–1100 нм представлены на рис.2. Фотографии образцов лазерной керамики и одного из исследованных дисковых модулей приведены на вставках к рис.2 и 3. Как и ожидалось, максимумы поглощения в ближней ИК области спектра находились на длине волны 808 нм, что

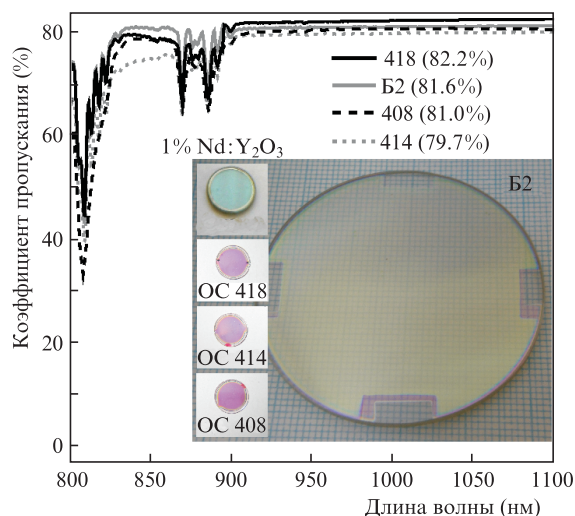


Рис.2. Спектры пропускания 1% Nd:YAG-керамик, в скобках указаны коэффициенты пропускания образцов T_{exp} на длине волны 1064 нм. На вставке – фотографии образцов лазерной керамики 1% Nd:YAG и 1% Nd:Y₂O₃ [10].

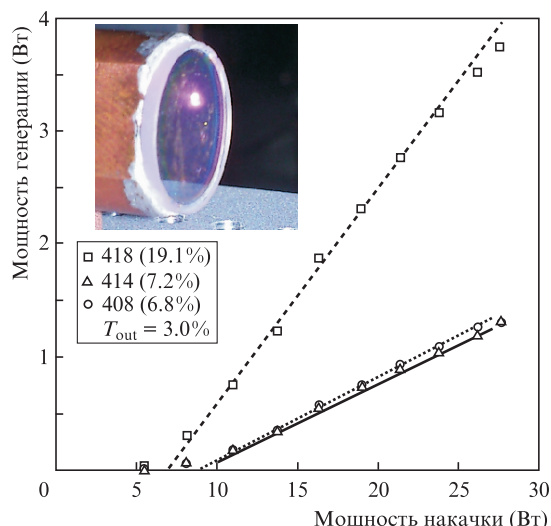


Рис.3. Зависимости выходной мощности генерации от мощности накачки для образцов № 408, 414, 418, в скобках указаны дифференциальные эффективные коэффициенты генерации η . На вставке – фотография одного из дисковых модулей (керамика № 408).

типично для образцов иттрий-алюминиевых гранатов, активированных трехвалентным неодимом. Сравнение коэффициентов пропускания керамик в области прозрачности (1000–1100 нм) T_{exp} и расчетного пропускания T_c оптического материала с показателем преломления $n = 1.80$ (рассматривается идеальная однородная керамика, учтены только френелевские потери на отражение) позволяет оценить абсолютную величину потерь на поглощение и рассеяние $T_{loss} = T_c - T_{exp}$ (табл.1).

На рис.3 представлены результаты измерений мощности генерации образцов № 408, 414 и 418 1% Nd:YAG-керамик в геометрии короткого резонатора ($L = 12$ мм, $T_{out} = 3\%$, $r = -40$ мм) для четырехпроходной схемы накачки, где возвратное зеркало 32 (см. рис.1) обеспечивает два дополнительных прохода. В отсутствие зеркала 32 в исследуемых образцах за два прохода поглощается 50% мощности накачки, тогда как при четырех проходах доля поглощенной мощности возрастает до 75%. Таким образом, дифференциальная и оптическая эффективные коэффициенты генерации, пересчитанные на поглощенную мощность накачки, для лучшего из исследованных образцов (№ 418) из керамики 1% Nd:YAG составляют 25.5% и 18.1% соответственно (табл.1).

Результаты исследования генерационных характеристик образца Б2 из керамики 1% Nd:YAG ($\varnothing 47 \times 2.1$ мм) представлены на рис.4 и в табл.1. В этих экспериментах оптическая мощность блока накачки была увеличена до 53 Вт (непрерывный режим) за счет использования дополнительной диодной линейки, при этом диаметр пятна в фокусе составил 0.95 мм. Сопоставив значения диффе-

Табл.1. Параметры генерации образцов оптической керамики 1% Nd:YAG, коэффициент пропускания выходного зеркала $T_{out} = 3\%$.

Номер образца	Порог генерации (Вт)	k (%)	η (%)	T_{loss} (%)
408	8.7	4.9	6.8	2.1
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	1.5

Примечание: k – оптическая эффективность, η – дифференциальная эффективность.

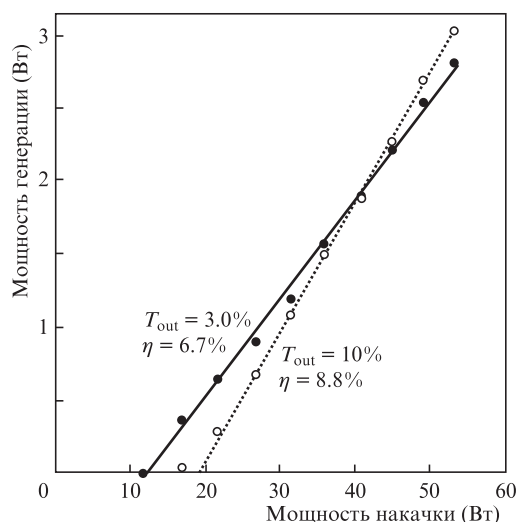


Рис.4. Зависимости выходной мощности генерации от мощности накачки для оптической керамики Б2 большого размера ($\varnothing 47 \times 2.1$ мм).

рнциальной эффективности генерации (6.7% и 8.8%) керамики Б2 при различных значениях пропускания выходного зеркала ($T_{out} = 3\%$ и 10%), мы оценили совокупные потери лазерного резонатора [13], которые в данном случае составили 1.9%. С учетом потерь на зеркалах и просветлении ($\sim 0.5\%$) «внутренние» потери (на рассеяние и поглощение) для образца Б2 равны $\sim 1.4\%$, что практически совпадает с величиной $T_{loss} = 1.5\%$, определенной по спектрам пропускания. В пересчете на удельную величину потери в керамике Б2 находятся на уровне $3.5 \times 10^{-2} \text{ см}^{-1}$. Согласно данным, представленным в табл.1, имеется разумное качественное соответствие между эффективностью генерации керамики и оценками потерь T_{loss} . Так, например, наилучшая эффективность генерации соответствует наиболее высокому светопропусканию (образец № 418). Вместе с тем для дальнейшего увеличения эффективности генерации потери в керамических образцах должны быть существенно снижены, по крайней мере до уровня 10^{-3} см^{-1} .

Необходимо также отметить, что по механическим (прочностным) характеристикам все исследованные образцы керамики 1%Nd:YAG, в том числе образец большого размера Б2, показали вполне удовлетворительные

результаты, поскольку при плотности мощности накачки на уровне 6 кВт/см^2 не разрушился ни один из активных элементов, лишь в отдельных случаях наблюдалась частичная деградация металлизированного слоя.

4. Заключение

Полученные результаты позволяют заключить, что к настоящему времени достигнут значительный прогресс в улучшении функциональных характеристик российских лазерных нанокерамик. Так, например, продемонстрирована дифференциальная эффективность керамики 1% Nd:YAG на уровне 25%. Синтез керамического Nd:YAG-диска большого размера ($\varnothing 47 \times 2.1$ мм) также является важным технологическим достижением. Тем не менее 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 мультикиловатного класса.

Работа выполнена в рамках проекта 6.6 программы №13 Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения», проекта УрО РАН № 12-С-2-1018 и при поддержке РФФИ (грант № 31209-а).

1. Ikesue A., Kinoshita T., Kamata K., et al. *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**, 1033 (1995).
2. Lu J., Murai T., Takaichi K., Uematsu T., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3586 (2001).
3. Sanghera J., Kim W., Villalobos G., et al. *Materials*, **5**, 258 (2012).
4. Bagayev S.N., Osipov V.V., Solomonov V.I., et al. *Opt. Materials*, **34**, 1482 (2012).
5. Котов Ю.А., Осипов В.В., Иванов М.Г. и др. *ЖТФ*, **72**, 76 (2002).
6. Kotov Yu.A., Osipov V.V., Ivanov M.G., et al. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, **5**, 171 (2003).
7. Котов Ю.А., Осипов В.В., Саматов О.М. и др. *ЖТФ*, **74**, 72 (2004).
8. Kotov Yu.A., Osipov V.V., Ivanov M.G., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6344**, 1 (2005).
9. Osipov V.V., Kotov Yu.A., Ivanov M.G., et al. *Laser Phys.*, **16**, 116 (2006).
10. Осипов В.В., Хасанов О.Л., Шитов В.А. и др. *Российские нанотехнологии*, **3**, 98 (2008).
11. Clarkson W.A., Hanna D.C., et al. *Opt. Lett.*, **21**, 375 (1996).
12. Багаев С.Н., Осипов В.В., Соломонов В.И. и др. *Перспективные материалы*, **4**, 18 (2012).
13. Caird J.A., Payne S.A., Staber P.R., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 1077 (1988).