

# Дисковый лазер на основе композитного активного элемента из Yb:YAG/YAG

И.И.Кузнецов, И.Б.Мухин, О.Л.Вадимова, О.В.Палашов

*Разработан дисковый лазерный модуль на основе композитного активного элемента из Yb:YAG/YAG с усилением по слабому сигналу 1.25 и запасенной энергией 400 мДж при непрерывной накачке. Экспериментально исследованы усиление и термонаведенные фазовые искажения излучения в нем. На основе модуля построен дисковый лазер со средней мощностью 300 Вт и дифференциальной эффективностью 42%.*

**Ключевые слова:** дисковый лазер, Yb:YAG, композитный активный элемент, усиленное спонтанное излучение, тепловые эффекты, высокая средняя мощность.

## 1. Введение

Перспективность и бурное развитие твердотельных лазеров с диодной накачкой на основе тонких дисков из Yb:YAG (далее – дисковые лазеры) обусловлены их высокой средней мощностью, большой пиковой мощностью и значительной эффективностью [1]. На сегодняшний день дисковые лазеры достигли киловаттной средней мощности при сохранении хорошего качества пучка [2] и энергии импульсов в сотни миллиджоулей при высокой частоте их следования [3]. Дисковые лазеры активно применяются для микрообработки материалов [4] и широко используются для генерации мощного вторичного излучения в рентгеновском и дальнем ИК диапазонах [5]. Такое излучение становится уникальным инструментом при проведении фундаментальных научных исследований [6]. Масштабирование дисковых лазеров с целью получения больших средних и пиковых мощностей открывает для них возможность новых научных и технологических приложений.

Наращивание мощности дискового лазера осуществляется путем увеличения диаметра накачки при неизменной плотности ее мощности. Температура и амплитуда термонаведенных фазовых искажений в кристалле при этом практически не меняются. Однако растет влияние эффекта усиленного спонтанного излучения (УСИ), связанного с большим коэффициентом усиления вдоль радиальной координаты. Влияние УСИ увеличивается из-за запираения излучения люминесценции в лазерном кристалле, обусловленного полным внутренним отражением от торцов кристалла. Эффективным способом, позволяющим существенно ослабить влияние УСИ, является использование композитного активного элемента (АЭ), состоящего из тонкого диска из Yb:YAG и толстого диска из YAG, скрепленных торцевыми сторонами термодиффузионной

сваркой (далее – композитный АЭ) [7]. В таком АЭ отсутствует полное внутреннее отражение на одном из торцов кристалла Yb:YAG и излучение люминесценции свободно покидает допированную область. Кроме того, в композитном АЭ ослабляется эффект нелинейного тепловыделения, появляющийся в средах, легированных Yb<sup>3+</sup>, при высокой плотности инвертированных состояний [8]. Эти преимущества композитного АЭ играют наибольшую роль при создании на их основе импульсных лазерных усилителей, где необходимо получить высокий коэффициент усиления и большую запасенную энергию. Единственным недостатком композитного АЭ, на наш взгляд, являются термонаведенные фазовые искажения излучения в его недопированной части.

В рамках данного исследования разработан дисковый лазерный модуль на основе композитного АЭ из Yb:YAG/YAG. Проведено экспериментальное исследование усиления и термонаведенных фазовых искажений излучения в нем. С использованием такого модуля создан непрерывный лазер со средней мощностью 300 Вт при дифференциальной эффективности 42%.

## 2. Разработка лазерного модуля

Схема разработанного лазерного модуля представлена на рис.1,а. Композитный АЭ изготовлен оригинальным методом термодиффузионной сварки [9] двух кристаллических образцов диаметром 10 мм, один из которых – Yb:YAG (концентрация Yb 10 ат.%, толщина 300 мкм), второй – YAG (толщина 4 мм). На один торец АЭ нанесено диэлектрическое зеркало и металлизующее покрытие, на другой – диэлектрическое просветляющее покрытие. Со стороны торца с металлизацией АЭ припаян к радиатору с помощью индиевого припоя, с другого торца в АЭ заводится излучение накачки и сигнальное излучение. Боковая поверхность АЭ впаяна в медный держатель. Радиатором служит композитная металлическая пластина из молибдена и меди толщиной 1 мм. Использование молибдена позволяет минимизировать различие между коэффициентами теплового расширения кристалла и радиатора. Медное покрытие позволяет осуществить припаивание кристалла к радиатору. На

И.И.Кузнецов, И.Б.Мухин, О.Л.Вадимова, О.В.Палашов. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: ivanushka911@yandex.ru

Поступила в редакцию 23 октября 2014 г., после доработки – 13 ноября 2014 г.

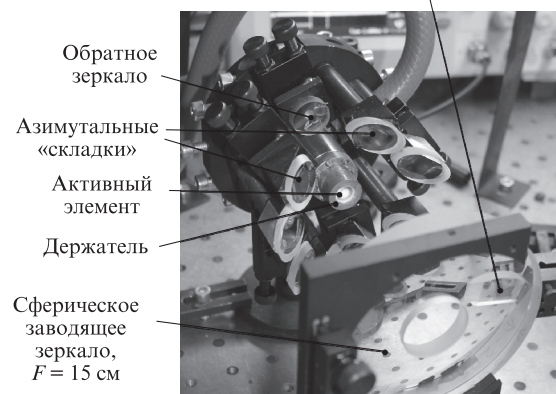
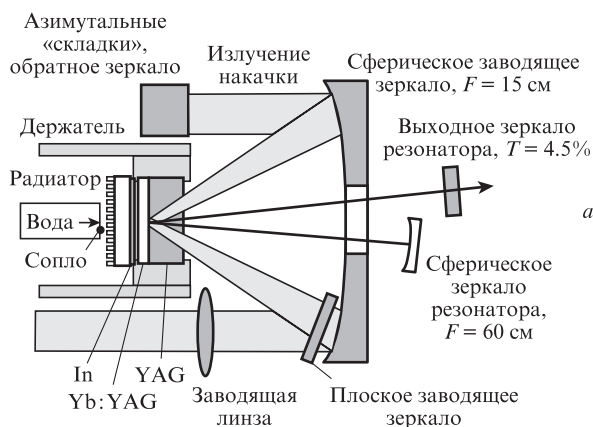


Рис.1. Схема лазерного модуля и лазерного резонатора (расстояние от кристалла до сферического зеркала – 20 см, от кристалла до выходного зеркала – 30 см) (а) и фотография лазерного модуля (б).

обратную сторону радиатора нанесена мелкомасштабная насечка (шаг 300 мкм), чтобы увеличить эффективность водного охлаждения. Радиатор охлаждался струей воды. Расстояние от радиатора до конца трубки было равно 0.5 мм. Чтобы избежать застоя воды в центре струи, трубка оканчивалась соплом с небольшими отверстиями. Давление воды в системе составляло 1.7 атм, расход воды равнялся 3 л/мин.

Для полного поглощения накачки использовалась оптическая схема с десятью V-образными проходами накачки через АЭ, состоящая из сферического заводящего зеркала (радиус кривизны 15 см) с АЭ в фокусе, четырех азимутальных «складок» и обратного зеркала [10]. Отличие от [10] заключалось в том, что для заведения первого прохода использовалось плоское заводящее зеркало (рис.1,а). Размер и профиль пучка на кристалле формировались с использованием заводящей линзы. Форма пучка на кристалле на всех проходах полностью повторяла форму пучка на первом проходе. Излучение лазера проходило через отверстие в заводящем сферическом зеркале. Фотография разработанного лазерного модуля представлена на рис.1,б.

### 3. Результаты экспериментов

В экспериментах диаметр пучка накачки равнялся 6 мм. Усиление по слабому сигналу за один V-образный проход композитного АЭ при импульсной накачке (длительность импульса 2.5 мс, частота следования 10 Гц) и при непрерывной накачке измерялось методом пробного пучка (в последнем случае усиление измерялось после установления в системе стационарного состояния). Численный

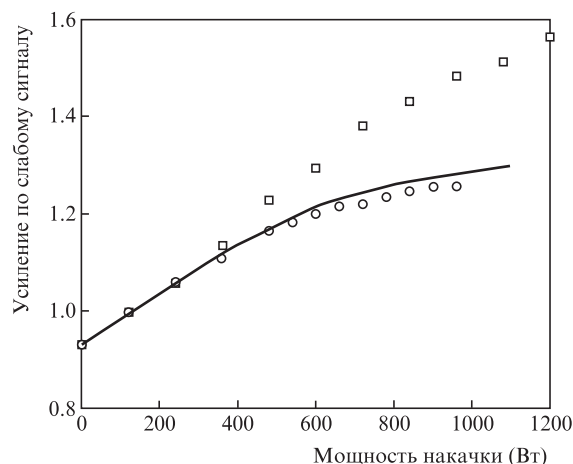


Рис.2. Экспериментально измеренное усиление по слабому сигналу за один V-образный проход композитного АЭ при импульсной накачке с длительностью импульсов 2.5 мс и частотой их следования 10 Гц (□) и при непрерывной накачке (○). Сплошная линия – результат расчета при непрерывной накачке.

расчет усиления проводился с использованием модели [11], учитывающей эффекты насыщения накачки, нагрева системы и УСИ. Результаты эксперимента и расчета представлены на рис.2. Различие между зависимостями для импульсной и непрерывной накачек связано с нагревом АЭ. Видно, что его влияние существенно. В эксперименте получено усиление 1.25, соответствующее запасенной энергии 400 мДж. Расчет показывает, что можно достичь усиления 1.3. Небольшое расхождение между экспериментальными и расчетными данными может быть связано с более высокой, чем ожидалось, температурой АЭ. Для достижения большего усиления необходима дальнейшая оптимизация системы охлаждения. Анализ литературных данных показывает, что в дисковых АЭ из Yb:YAG усиление меньше полученного даже при малых (2 мм) диаметрах накачки [12], а при увеличении диаметра оно еще уменьшается [13, 14]. Таким образом, благодаря ослаблению эффекта УСИ в АЭ композитной геометрии удалось увеличить усиление и запасенную энергию.

Термонаведенные фазовые искажения излучения считаются единственным недостатком композитного АЭ по сравнению с АЭ в виде обычного диска из Yb:YAG [15]. Это связано с прохождением лазерного излучения через еще один оптический элемент – кристалл YAG. Термонаведенные фазовые искажения излучения в разработанном лазерном модуле измерены методом фазово-сдвиговой интерферометрии [16]. Для этого лазерный модуль помещался в интерферометр Майкельсона, где АЭ играл роль одного из опорных зеркал. Измерялись набеги фазы излучения в плече интерферометра при включенной и выключенной накачке. Термонаведенные фазовые искажения, представляющие собой разность этих двух набегов фаз, измерены при наличии и в отсутствие лазерной генерации. Полученные профили искажений представлены на рис.3. Данные профили можно аппроксимировать параболой в области накачки (рис.3,а) и найти оптическую силу параболической составляющей тепловой линзы. Зависимость оптической силы тепловой линзы в композитном АЭ за один V-образный проход от мощности накачки приведена на рис.3,б. Видно, что в АЭ появляется довольно сильная тепловая линза, которую необходимо учитывать при построении оптической схемы лазера, при-

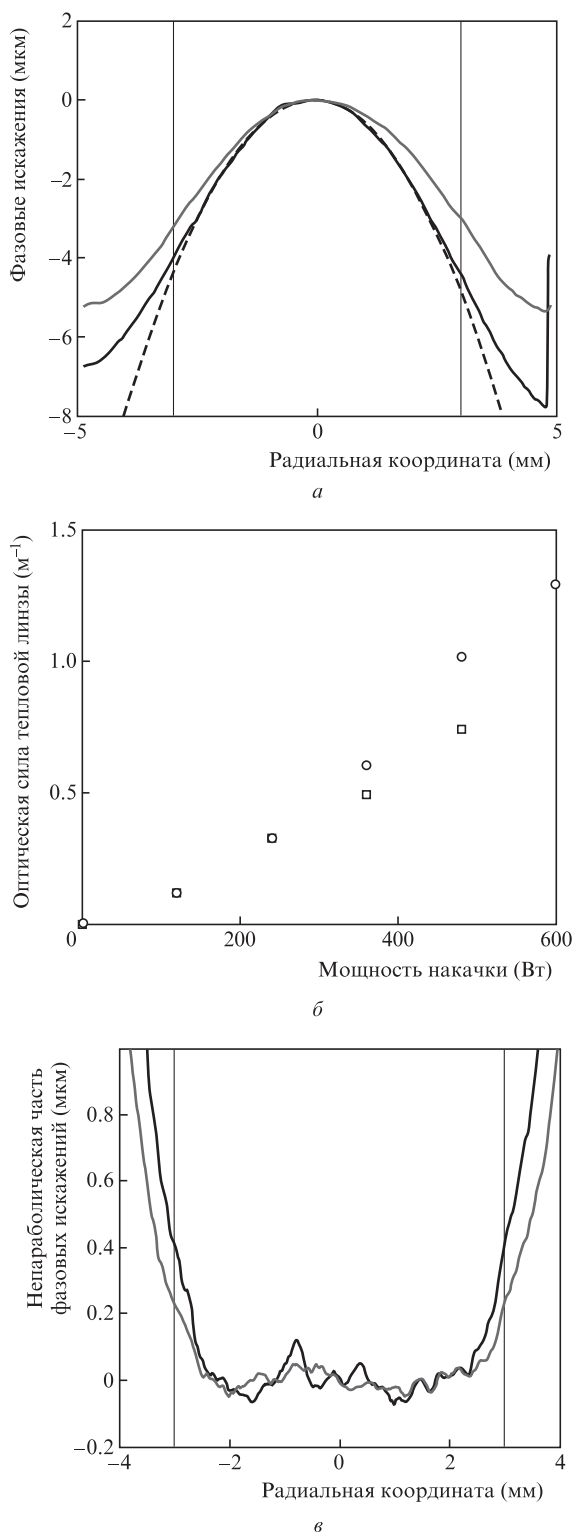


Рис.3. Профили термонаведенных фазовых искажений излучения за один V-образный проход композитного АЭ при мощности накачки 500 Вт (сплошная черная кривая – эксперимент с генерацией, сплошная серая кривая – эксперимент без генерации, штриховая кривая – парабола, вертикальные линии – границы области накачки) (а), зависимость оптической силы тепловой линзы в композитном АЭ за один V-образный проход от мощности накачки в отсутствие (□) и при наличии (○) лазерной генерации (б) и непараболическая часть термонаведенных фазовых искажений за один V-образный проход композитного АЭ при мощности накачки 500 Вт (сплошная черная кривая – эксперимент с генерацией, сплошная серая кривая – эксперимент без генерации, вертикальные линии – границы области накачки) (в).

чем при лазерной генерации она сильнее, чем без генерации. Это можно объяснить тем, что дефект кванта для лазерного излучения больше, чем для излучения люминесценции, из-за чего тепловыделение в присутствии лазерной генерации должно быть больше [17]. Такое поведение существенно отличается от результатов, полученных для дисков из Yb:YAG. Обычно в тонком диске тепловая линза без лазерной генерации больше, чем с ней, что обусловлено нелинейным тепловыделением, появляющимся в легированных Yb<sup>3+</sup> кристаллах при высокой плотности инверсных состояний [12]. Таким образом, полученные результаты показывают, что нелинейное тепловыделение ослабляется в композитном АЭ [8]. Следовательно, причиной нелинейного тепловыделения является поглощение излучения люминесценции, возникающее в кристалле Yb:YAG при большой плотности инверсии.

Важнейшим фактором, ограничивающим масштабирование дисковых лазеров, являются непараболические фазовые искажения, которые приводят к паразитным потерям и к ухудшению качества пучка. Чтобы найти непараболические фазовые искажения, нужно из измеренных фазовых искажений вычесть параболическую составляющую. Профиль непараболических фазовых искажений изображен на рис.3,в. Искажения в центре АЭ связаны с мелкомасштабными неоднородностями системы (неоднородность пучка накачки, кристалла и системы охлаждения). Кроме этих искажений присутствуют искажения, связанные с границами области накачки, где возникает поперечный поток тепла в кристалле Yb:YAG. Амплитуда непараболических фазовых искажений в области накачки в эксперименте без генерации составила 200 нм, что не превышает аналогичную величину в обычном диске из Yb:YAG [18]. При лазерной генерации амплитуда непараболических фазовых искажений в два раза больше (400 нм), и это может быть связано с увеличением тепловыделения. Таким образом, из результатов измерения следует, что с точки зрения фазовых aberrаций композитный АЭ не хуже обыкновенного дискового АЭ.

На основе разработанного лазерного модуля создан высокоэффективный непрерывный лазер, работающий в многомодовом режиме (схема лазерного резонатора показана на рис.1,а). Зависимость выходной мощности лазера от поглощенной мощности накачки представлена на рис.4. Удалось получить выходное излучение со средней

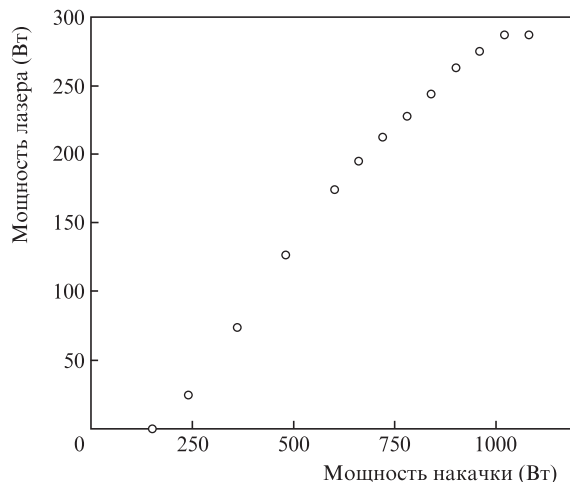


Рис.4. Зависимость выходной мощности дискового непрерывного лазера с композитным АЭ из Yb:YAG/YAG от мощности накачки.

мощностью 300 Вт и дифференциальной эффективностью 42%. Для дальнейшего увеличения эффективности лазера в ближайшее время будет усовершенствована система охлаждения АЭ и исследованы возможности уменьшения паразитных потерь. Средняя мощность лазера будет увеличена за счет роста мощности накачки.

#### 4. Заключение

Разработан дисковый лазерный модуль на основе композитного АЭ из Yb:YAG/YAG. Ослабление эффекта УСИ в композитном АЭ позволило достичь усиления по слабому сигналу 1.25 и запасенной энергии 400 мДж при непрерывной накачке после выхода системы в стационарное состояние. На основе разработанного модуля создан непрерывный лазер со средней мощностью 300 Вт при дифференциальной эффективности 42%. Экспериментально исследованы термонаведенные фазовые искажения в разработанном модуле. Показано наличие сильной тепловой линзы, фазовые aberrации в которой не превышают aberrации в обыкновенных дисках из Yb:YAG. Разработанный лазерный модуль может быть успешно использован при создании непрерывных и импульсно-периодических лазеров высокой средней мощности с различными параметрами выходного излучения. Высокое усиление и большая запасенная энергия делают его особенно привлекательным для применения в импульсных лазерных усилителях с высокой (более 1 кГц) частотой следования импульсов. В настоящее время на основе созданного модуля разрабатывается лазер с энергией импульсов 100 мДж и частотой их следования 1 кГц.

Работа поддержана мегагрантом Правительства РФ № 14.В25.31.0024, выполняемым на базе Института прикладной физики РАН, и грантом РФФИ № 13-02-97119 p\_поволжье\_a.

1. Giesen A., Speiser J. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13** (3), 598 (2007).
2. Peng Y.H., Lim Y.X., Cheng J., Guo Y., Cheah Y.Y., Lai K.S. *Opt. Lett.*, **38** (10), 1709 (2013).
3. Tümmler J., Jung R., Stiel H., Nickles P.V., Sandner W. *Opt. Lett.*, **34** (9), 1378 (2009).
4. Killi A., Stolzenburg C., Zawischa I., Sutter D., Kleinbauer J., Schad S., Brockmann R., Weiler S., Neuhaus J., Kalfhues S., Mehner E., Bauer D., Schlueter H., Schmitz C. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7193**, 71931T (2009).
5. Hong K.-H., Lai C.-J., Siqueira J.P., Krogen P., Moses J., Chang C.-L., Stein G.J., Zapata L.E., Kärtner F.X. *Opt. Lett.*, **39** (11), 3145 (2014).
6. Pohl R., Antognini A., Nez F., et al. *Nat. Lett.*, **466**, 213 (2010).
7. Kouznetsov D., Bisson J.-F. *J. Opt. Soc. Am. B*, **25** (3), 338 (2008).
8. Kuznetsov I.I., Mukhin I.B., Silin D.E., Vyatkin A.G., Vadimova O.L., Palashov O.V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **50** (3), 133 (2014).
9. Mukhin I., Perevezentsev E., Palashov O. *Opt. Mater. Express*, **4** (2), 266 (2014).
10. Erhard S., Giesen A., Karszewski M., Rupp T., Stewen C., in *Advanced Solid State Lasers* (Boston, Massachusetts: OSA, 1999, vol. 26).
11. Вадимова О.Л., Мухин И.Б., Кузнецов И.И., Палашов О.В., Перевезенцев Е.А., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **43** (3), 201 (2013).
12. Larionov M., Schuhmann K., Speiser J., Stolzenburg C., Giesen A., in *Advanced Solid-State Photonics. Techn. Digest* (Vienna, Austria, 2005, TuB49).
13. Speiser J., Giesen A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6871**, 68710J (2008).
14. Schulz M., Riedel R., Willner A., Düsterer S., Prandolini M.J., Feldhaus J., Faatz B., Rossbach J., Drescher M., Tavella F. *Opt. Express*, **20** (5), 5038 (2012).
15. Aleknavicius A., Gabalis M., Michailovas A., Girdauskas V. *Opt. Express*, **21** (12), 14530 (2013).
16. Creath K. *Prog. Optics*, **26**, 349 (1989).
17. Brown D.C., Vitali V.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **47** (1), 3 (2011).
18. Mende J., Schmid E., Speiser J., Spindler G., Giesen A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7193**, 71931V (2009).