

УДК 535:538.971

СОЗДАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ АКТИВАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИОННЫМ ПУЧКОМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЛАЗЕРАХ

© 2020 г. И. И. Кузнецов^{а, *}, И. Б. Мухин^а, М. Р. Волков^а, О. В. Палашов^а,
А. Е. Пестов^б, М. В. Зорина^б, Н. И. Чхало^б, М. С. Михайленко^б

^аИнститут прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950 Россия

^бИнститут физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603087 Россия

*e-mail: kuznetsov@ipfran.ru

Поступила в редакцию 30.03.2020 г.

После доработки 24.04.2020 г.

Принята к публикации 28.04.2020 г.

Реализован и отработан метод создания композитных активных элементов из разнородных оптических материалов, заключающийся в обработке поверхностей пучком тяжелых ионов аргона и формировании оптического контакта между скрепляемыми поверхностями. Созданы композитные активные элементы Yb:YAG/YAG и Yb:YAG/сапфир в геометрии тонкого диска. Элементы испытаны в схеме лазера высокой средней мощности. На элементе Yb:YAG/сапфир получена лазерная генерация с дифференциальной эффективностью 48% при мощности более 100 Вт, в то время как эффективность генерации на элементе Yb:YAG/YAG составила 39%, что является следствием более эффективного охлаждения активной среды через сапфир.

Ключевые слова: лазер высокой средней мощности, дисковый Yb:YAG лазер, композитные активные элементы, шероховатость, ионно-пучковое травление.

DOI: 10.31857/S1028096020100106

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня фемтосекундные лазеры экстремально высокой пиковой мощности (более 1 ТВт) активно применяются в научно-исследовательских лабораториях всего мира для эффективного ускорения заряженных частиц и генерации яркого когерентного рентгеновского и терагерцового излучения [1, 2]. Данные технологии смогут найти множество приложений в промышленности, медицине и других областях. Например, в качестве источников когерентного рентгеновского излучения для литографии, или в качестве источников протонов для адронной лучевой терапии и так далее. Однако для их широкого внедрения требуются лазеры, которые помимо экстремально высокой пиковой мощности обладают высокой средней по времени мощностью, т.е. характеризуются высокой частотой следования импульсов. Одним из способов достижения этого является использование твердотельных лазеров на основе сред, легированных ионами Yb³⁺ с диодной накачкой [3]. Данные среды обладают малым дефрактом кванта, что приводит к снижению их тепловой нагрузки и повышению эффективности системы. Ключевой проблемой одновременного

достижения высокой средней мощности и высокой энергии является выбор геометрии активного элемента, которая одновременно должна обеспечить эффективное охлаждение среды (т.е. элемент должен быть малого размера, по крайней мере, вдоль одной координаты) и эффективное запасание и извлечение энергии. Можно выделить три группы, применяемые в лазерах высокой средней мощности: тонкий стержень (диаметр менее 1 мм) [4], тонкий слэб (плоский кристалл в форме параллелепипеда толщиной менее 1 мм) [5] и тонкий диск (толщина менее 0.5 мм, диаметр более 10 мм) [3]. Все геометрические формы обладают определенными недостатками, которые на сегодняшний день не позволяют достигнуть требуемых выходных параметров. В тонком стержне и тонком слэбе апертура ограничивается эффективностью охлаждения, что не позволяет увеличить энергию импульсов из-за оптического пробоя торцов. В тонком диске охлаждение происходит вдоль оси распространения пучка и не ограничивает апертуру активного элемента. Однако при увеличении диаметра накачиваемой области возникает эффект усиленного спонтанного излучения в поперечном направлении, ограничи-

вающий энергию, запасенную в среде. Таким образом, задача поиска новых геометрических форм остается актуальной. Перспективным решением является использование композитных активных элементов. Особый интерес представляют композиты из разнородных материалов, а именно, из лазерных сред и оптических материалов с высокой теплопроводностью, которые послужат для отведения тепла от активной среды (монокристаллы сапфира Al_2O_3 , карбида кремния SiC , искусственного алмаза и так далее).

На сегодняшний день известно множество различных методов создания композитных активных элементов. Одна группа методов основана на термодиффузионной сварке образцов, которая включает соединение образцов и их нагрев до температуры, близкой к температуре плавления [6, 7]. Данные методы позволяют создавать композиты, у которых прочность контакта сравнима с прочностью самого оптического материала, но эти методы работают только с материалами с одинаковыми или близкими коэффициентами теплового расширения. Другая группа методов основана на химической активации поверхностей образцов [8]. Они требуют учета химических свойств скрепляемых материалов и не могут претендовать на универсальность. Для создания композитных элементов из разнородных оптических сред наиболее перспективными представляются методы, основанные на учете сил Ван-дер-Ваальса [9, 10]. Они заключаются в приведении предварительно обработанных поверхностей в оптический контакт. Сила контактов, созданных данными методами, определяется расстоянием, на которое сближены поверхности и сильно зависит от качества их обработки. Перспективным способом финишной обработки поверхностей является травление пучком тяжелых ионов, который полностью счищает все инородные образования. Такую обработку называют активацией поверхностей. Данная группа методов особенно привлекательна для лазерной техники, так как поверхность контакта максимально очищается от посторонних материалов, которые могут привести к оптическому пробою в мощном лазерном поле. Кроме того, порог лучевой стойкости сильно зависит от шероховатости поверхности оптических компонентов. Для обеспечения высоких плотностей мощности лазерного излучения шероховатость поверхности должна быть на нанометровом уровне [11, 12]. Травление пучком тяжелых ионов позволяет уменьшить шероховатость поверхностей. Такой процесс не сопровождается нагревом, поэтому применим в случае разнородных материалов с различными коэффициентами теплового расширения.

В рамках настоящей работы реализован и отработан метод создания композитных активных

элементов из разнородных оптических материалов. Он заключается в обработке поверхностей пучком тяжелых ионов аргона и приведении скрепляемых поверхностей в оптический контакт. Созданы композитные элементы из широко используемого лазерного материала – алюмо-иттриевого граната, легированного ионами иттербия (Yb:YAG), с кристаллами чистого алюмо-иттриевого граната (YAG) и с монокристаллами сапфира, т.е. Yb:YAG/YAG и Yb:YAG/сапфир . Проведены испытания композитных элементов в схеме лазера высокой средней мощности.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Подготовка образцов

Процесс создания композитных активных элементов лазера можно разделить на три стадии. Первая стадия – подготовка образцов для создания композитов, вторая – создание композитов и третья – изготовление активных элементов из полученных композитов. На первой стадии подготавливали образцы из кристаллов Yb:YAG , YAG и сапфира в форме дисков. При подготовке образцов ключевое значение играет качество обработки скрепляемых поверхностей, так как оно определяет силу оптического контакта. Поверхности образцов были отполированы до достижения плоскостности менее $\lambda/10$ и шероховатости ~ 2 нм (среднеквадратичное отклонение RMS). Плоскостность поверхностей контролировали с помощью фазово-сдвигового интерферометра. Для контроля шероховатости использовали стенд на базе атомно-силового микроскопа (АСМ) NTEGRA Prima [13]. Измерения проводили в диапазоне пространственных частот $q \in [(2.5 \times 10^{-2}) - (6.4 \times 10^1)]$ мкм $^{-1}$ (снимали кадры размером от 2×2 до 40×40 мкм). На рис. 1 приведены примеры измерений плоскостности и шероховатости поверхностей образцов сапфира.

По результатам АСМ-измерений восстанавливали функцию спектральной плотности мощности шероховатости – PSD -функцию (PSD – Power Spectral Density) (рис. 2) и по методике, описанной, например в [14], рассчитывали эффективную шероховатость поверхности. Под эффективной шероховатостью (σ_{eff}) принято понимать площадь под кривой PSD -функции в соответствующем диапазоне пространственных частот [14]. Минимальная частота определяется размером кадра ($1/L$), максимальная – количеством точек на кадре (n/L).

Как видно из рис. 1б и 2, основной вклад в эффективную шероховатость вносят царапины. Это дефекты с латеральным размером неоднородности $3-0.05$ мкм (диапазон пространственных частот $q \in [(3 \times 10^{-1}) - (2 \times 10^1)]$ мкм $^{-1}$). Очевидно,

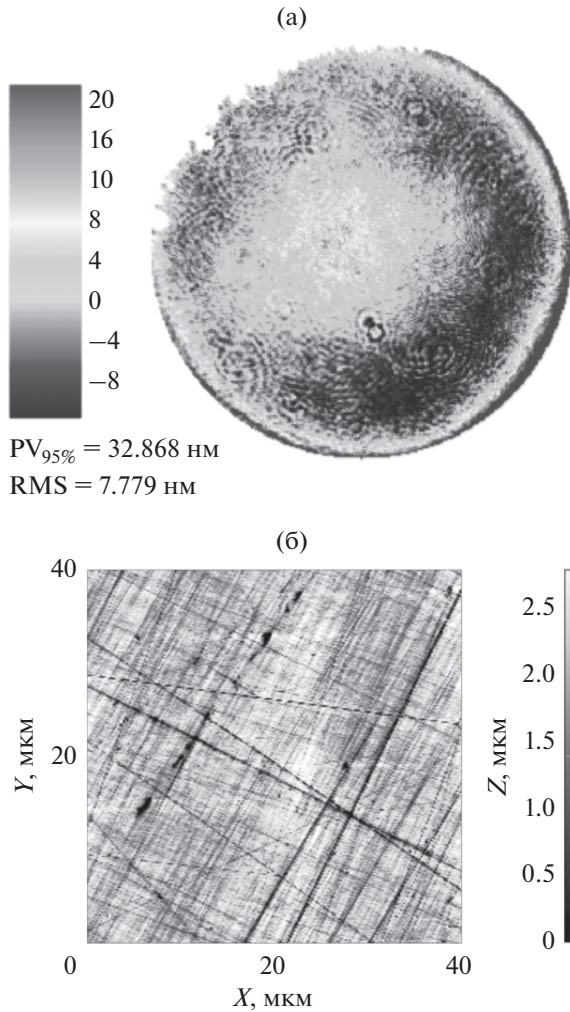


Рис. 1. Образец сапфира: а – плоскость поверхности; б – шероховатость поверхности.

что применение химико-механической полировки со снятием нарушенного слоя позволит в значительной степени убрать царапины и заметно понизить эффективную шероховатость [15]. Примененная в настоящей работе стандартная методика глубокой шлифовки и полировки с поэтапным уменьшением зерна полирующего агента позволила получить высококачественную поверхность с шероховатостью порядка 2 нм.

После механической обработки (полировки и планаризации) поверхность образцов отмывали от остатков абразива и полировальных смол. Для удаления органических загрязнений образец промывали в 10%-растворе дихромата калия ($K_2Cr_2O_7$) в серной кислоте (H_2SO_4). Образец, помещенный в стеклянный держатель, опускали в раствор и полоскали в течение нескольких минут. Затем оставшийся на образце реактив был нейтрализован в водном 10%-растворе КОН, который в свою

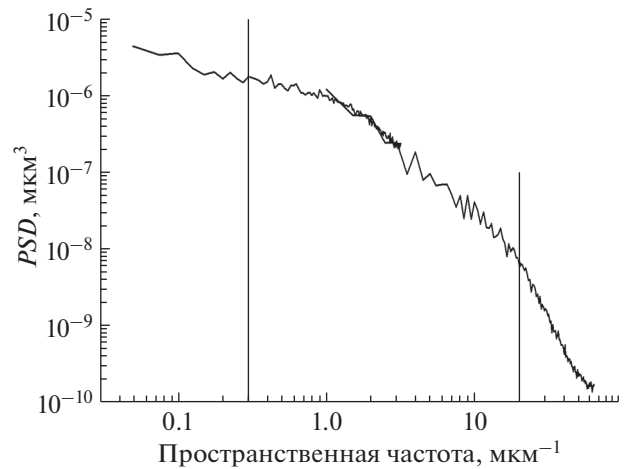


Рис. 2. PSD-функция шероховатости поверхности образца сапфира, построенная по данным АСМ (кадры размером 40×40 и 2×2 мкм). Вертикальные линии ограничивают диапазон пространственных частот (3×10^{-1})–(2×10^1) мкм $^{-1}$. Эффективная шероховатость 2.4 нм.

очередь смывали в потоке деионизированной воды. Очистку от механических загрязнений проводили за счет мытья в ультразвуковой ванне: образец помещали в колбу с изопропиловым спиртом (ОСЧ), доведенным до кипения, и подвергали воздействию ультразвука в течение нескольких минут. Качество поверхности после процедуры очистки проверяли в атомно-силовом микроскопе.

Создание композитов

Для активации поверхности перед формированием оптического контакта между лазерными компонентами ее обрабатывали пучком ускоренных ионов. Однако следует учитывать, что ионно-пучковое травление может приводить и к деградации поверхности. Поэтому на первом этапе было изучено влияние ионно-пучкового травления на шероховатость поверхности лазерных компонентов. Эксперименты проводили на установке, подробно описанной в [16]. В ряде работ (например, [15, 17, 18]) показано, что шероховатость улучшается или остается на исходном уровне при энергии ионов менее 1.5 кэВ и углах падения ионов $\theta_{пад} = 60^\circ - 90^\circ$ и $\theta_{пад} < 15^\circ$ ($\theta_{пад}$ – угол падения ионов на поверхность образца, отсчитывается от поверхности). Исходя из этих данных были выбраны следующие параметры эксперимента: $E_{ион} = 800$ эВ, $\theta_{пад} \sim 5^\circ$. PSD-функции шероховатости поверхности кристаллов сапфира до и после ионной бомбардировки представлены на рис. 3.

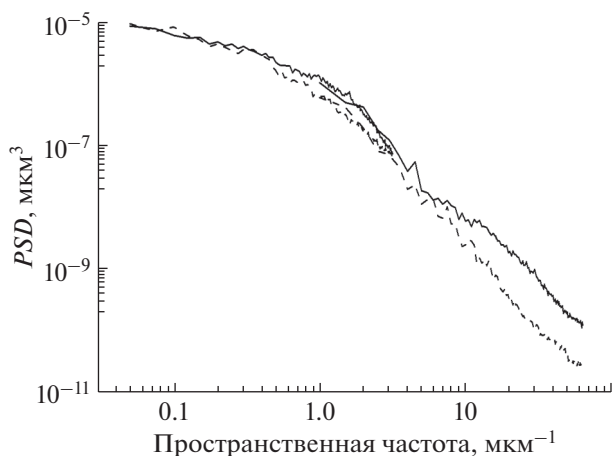


Рис. 3. PSD-функция шероховатости поверхности образца сапфира, построенная по данным АСМ (кадры размером 40×40 и 2×2 мкм) до (сплошная линия) и после (пунктир) ионной обработки. Эффективная шероховатость до обработки 2.3 нм, после обработки 2.1 нм.

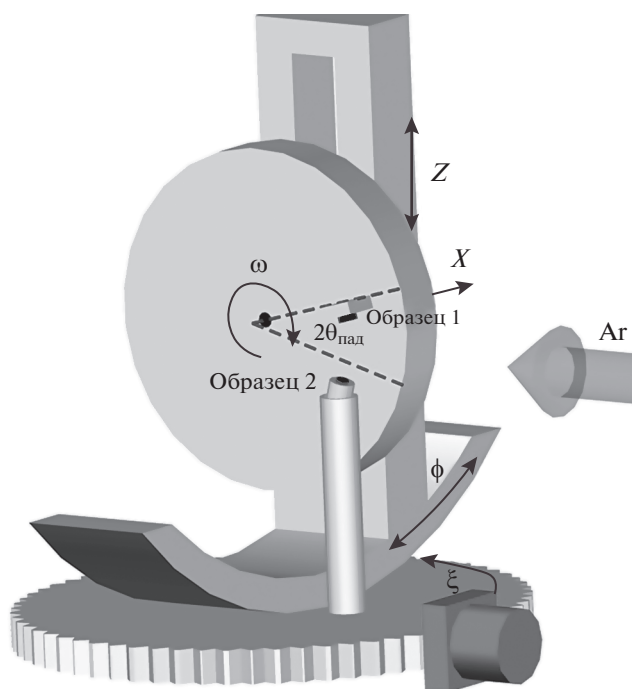


Рис. 4. Схема процесса ионного травления.

Как можно видеть, ухудшения шероховатости поверхности не произошло, даже наблюдается незначительное ее сглаживание в области высоких пространственных частот. Таким образом, эксперименты показали, что ионно-пучковое травление может быть использовано для активации поверхности, оно не ухудшает ее топологию. Схема эксперимента по активации поверхности

пары образцов ионным травлением перед приведением их в оптический контакт представлена на рис. 4.

Методика приведения пары лазерных компонентов в оптический контакт предполагает следующую последовательность действий. Пару образцов устанавливают в вакуумную камеру под скользящим углом к направлению распространения ионного пучка. Поверхности облучают пучком ускоренных ионов Ag, съем материала происходит на уровне 50–100 нм. Затем активированные поверхности соединяют, возникает оптический контакт. Для этого образец № 2 жестко закрепляют в держателе, а образец № 1 устанавливают на поворотный механизм пятиосного столика (рис. 4). После облучения образец № 1 поворачивают на угол, равный удвоенному углу падения ионов ($2\theta_{\text{пад}}$) и приводят в контакт с образцом № 2. Далее дополнительно прикладывают усилие в вертикальном направлении за счет перемещения столика образцов по Z-координате. После допуска в установку воздуха приложенные напряжения снимают, пара образцов остается в прочном оптическом контакте.

Создание активных элементов

На третьей стадии из композитов изготавливали активные элементы лазера в форме тонкого композитного диска. Данные элементы представляют собой тонкий слой активной среды Yb:YAG (толщина, как правило, меньше 300 мкм, а диаметр больше 10 мм), прикрепленный к толстому слою нелазерного оптического материала (YAG или сапфир в рассматриваемом случае). Со стороны Yb:YAG на элемент наносят диэлектрическое зеркало, а с обратной стороны – диэлектрическое просветляющее покрытие. Активный элемент зеркальной стороной прикрепляют к тепловоду, он работает по схеме так называемого активного зеркала. Излучение накачки и лазерное излучение заводят в активный элемент с обратного торца. Данная геометрия является модификацией геометрии тонкого диска и имеет свои преимущества и недостатки. Слой нелазерного материала, во-первых, служит для отвода тепла от легированной части, во-вторых, придает элементу жесткость и, в-третьих, позволяет ослабить эффект усиленного спонтанного излучения. Дело в том, что излучение спонтанной люминесценции может запереться в тонком слое активной среды за счет эффекта полного внутреннего отражения на границах с воздухом. Многократно отражаясь, излучение распространяется внутри среды, усиливаясь и унося с собой большую часть энергии, запасенной в среде. Когда активная среда одной из поверхностей соприкасается со слоем оптического материала с близким или большим

показателем преломления, эффект полного внутреннего отражения отсутствует, и спонтанное излучение покидает лазерную среду, не успев усиливаться. На рис. 5 показана геометрия простого и композитного дисковых активных элементов и схема распространения усиленного спонтанного излучения в них.

Недостатком же композитного диска по сравнению с обычным являются термонаведенные фазовые искажения излучения в толстом слое не лазерного материала. Данная проблема на сегодняшний день не позволяет применять композитные дисковые элементы типа Yb:YAG/YAG в высокомошных лазерах. Очевидным решением является использование вместо кристалла YAG материалов с большим коэффициентом теплопроводности, например, сапфира.

В рамках настоящей работы были изготовлены следующие композитные элементы: Yb:YAG/YAG – диаметр Yb:YAG 10 мм, диаметр YAG 12 мм, толщина Yb:YAG 0.23 мм, толщина YAG 1.47 мм; Yb:YAG/сапфир – диаметр Yb:YAG 10 мм, диаметр сапфира 13 мм, толщина Yb:YAG 0.19 мм, толщина сапфира 1.96 мм. Уровень легирования Yb:YAG в обоих элементах составлял 10 ат. %.

ИСПЫТАНИЕ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Композитные активные элементы монтировали в лазерный квантрон высокомошного дискового лазера [19]. Для этого элементы зеркальной стороной приклеивали на теплоотвод из искусственного поликристаллического алмаза. Алмаз закрепляли в системе проточного водяного охлаждения, где он подвергался воздействию мощной, вертикально падающей на его поверхность струи воды. Квантрон размещали в схеме высокомошного дискового лазера (рис. 6).

В активный элемент заводили излучение диодной накачки с длиной волны 940 нм и со средней мощностью до 1.2 кВт. Диаметр пучка накачки на элементе составлял 3.5 мм. Излучение частично поглощалось в активном элементе, а частично отражалось и попадало на измеритель мощности для контроля поглощенной мощности накачки. Для получения лазерной генерации активный элемент помещали в многомодовый лазерный резонатор, состоящий из плоского выходного зеркала с коэффициентом пропускания 10%, вогнутого зеркала с радиусом кривизны 120 см и активного элемента. Зависимость мощности лазерной генерации от поглощенной мощности накачки приведена на рис. 7.

В обоих элементах получена эффективная лазерная генерация с мощностью более 100 Вт. Элементы выдержали воздействие накачки, что сви-

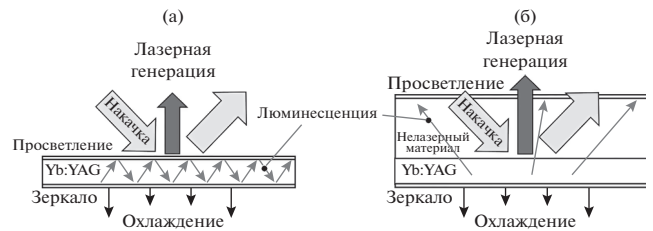


Рис. 5. Геометрия простого (а) и композитного (б) дисковых активных элементов, схема заведения накачки и лазерного излучения, а также схема распространения лучей усиленного спонтанного излучения в них.

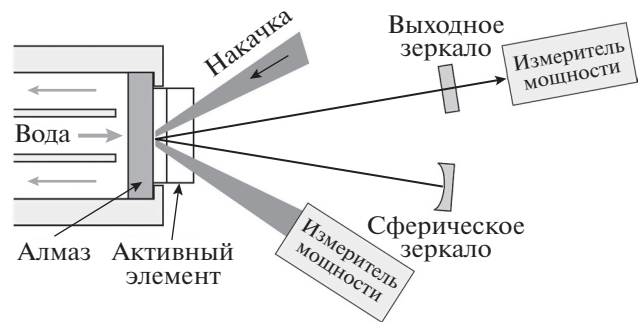


Рис. 6. Схема дискового лазера с квантроном на композитном активном элементе.

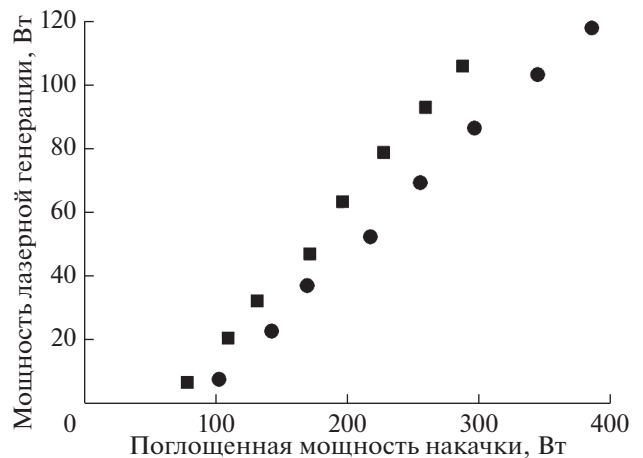


Рис. 7. Зависимость мощности лазерной генерации от поглощенной мощности накачки для композитного элемента Yb:YAG/YAG (кружки) и Yb:YAG/сапфир (квадраты).

детельствует о достаточной прочности контактов для применения в лазерах высокой средней мощности. Дифференциальная эффективность лазерной генерации (угол наклона графиков на рис. 7) для композита Yb:YAG/сапфир составила 48%, а для композита Yb:YAG/YAG – 39%. Это след-

стве более эффективного охлаждения активной среды через кристалл сапфира, что свидетельствует о перспективности использования оптических материалов с высокой теплопроводностью для создания композитных элементов лазера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отработан и реализован метод создания композитных активных элементов из разнородных оптических материалов. Он основан на подготовке поверхностей элементов, включающую их полировку, очистку и активацию пучком ускоренных ионов Ag с последующим приведением в оптический контакт внутри вакуумной камеры. С помощью данного метода созданы композитные активные элементы Yb:YAG/YAG и Yb:YAG/сапфир в геометрии диска. Композитные активные элементы испытаны в схеме высокомошного дискового лазера с накачкой до 1.2 кВт. Созданный оптический контакт оказался достаточно прочным для применения в лазерах высокой средней мощности. На элементе Yb:YAG/сапфир получена более эффективная лазерная генерация, чем на Yb:YAG/YAG, что является следствием более эффективного охлаждения активной среды. Это свидетельствует о перспективности применения композитных элементов из разнородных оптических материалов в лазерах высокой средней мощности. В дальнейшем планируется провести исследования фазовых искажений в обоих активных элементах, а также изготовить композитные элементы с применением других оптических материалов с большей теплопроводностью, таких как карбид кремния и искусственный алмаз.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ИФМ РАН при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-02-00631) в части реализации метода создания и изготовления композитов, (грант № 17-02-00640 и) в части изучения морфологии поверхности при ионно-пучковом травлении, Российского научного фонда (проект № 18-72-10134) в части испытания активных элементов в схеме высокомошного лазера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hooker S.M.* // Nature Photonics. 2013. V. 7. № 10. P. 775.
<https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.234>
2. *Reagan B.A., Berrill M., Wernsing K.A. et al.* // Phys. Rev. A. 2014. V. 89. P. 053820.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.89.053820>
3. *Nubbemeyer T., Kaumanns M., Ueffing M. et al.* // Opt. Lett. 2017. V. 42. P. 1381.
<https://doi.org/10.1364/OL.42.001381>
4. *Lesparre F., Gomes J.T., Délen X. et al.* // Opt. Lett. 2016. V. 41. P. 1628.
<https://doi.org/10.1364/OL.41.001628>
5. *Schmidt B.E., Hage A., Mans T. et al.* // Opt. Express. 2017. V. 25. P. 17549.
<https://doi.org/10.1364/OE.25.017549>
6. *Griebner U., Grunwald R., Schönagel H.* // Opt. Commun. 1999. V. 164. № 4–6. P. 185.
[https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(99\)00185-6](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(99)00185-6)
7. *Mukhin I., Perevezentsev E., Palashov O.* // Opt. Mater. Express. 2014. V. 4. P. 266.
<https://doi.org/10.1364/OME.4.000266>
8. *Traggis N.G., Claussen N.R.* // Proc. SPIE. 2010. V. 7578. P. 75780F.
<https://doi.org/10.1117/12.846285>
9. *Lee H., Meissner H.E., Meissner O.R.* // Proc. SPIE. 2006. V. 6216. P. 62160O.
<https://doi.org/10.1117/12.665794>
10. *Ichikawa H., Yamaguchi K., Katsumata T.* // Opt. Express. 2017. V. 25. P. 22797.
<https://doi.org/10.1364/OE.25.022797>
11. *Li Y., Yuan Zh., Wang J. et al.* // Opt. Laser Technol. 2017. V. 91. P. 149.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.12.022>
12. *De Vido M., Walsh M.J., Kirkpatrick S. et al.* // Opt. Mater. Express. 2017. V. 7. P. 3303.
<https://doi.org/10.1364/OME.7.003303>
13. *Chkhalo N.I., Salashchenko N.N., Zorina M.V.* // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. № 1. P. 016102.
<https://doi.org/10.1063/1.4905336>
14. *Барышева М.М., Вайнер Ю.А., Грибков Б.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 1. С. 71.
<https://doi.org/10.3103/S1062873811010059>
15. *Chkhalo N.I., Churin S.A., Pestov A.E. et al.* // Opt. Express. 2014. V. 22. № 17. P. 20094.
<https://doi.org/10.1364/OE.22.020094>
16. *Забродин И.Г., Закалов Б.А., Каськов И.А. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 9. С. 109.
<https://doi.org/10.7868/S0207352813070214>
17. *Liao W., Dai Y., Xie X. et al.* // Opt. Express. 2014. V. 22. № 1. P. 377.
<https://doi.org/10.1364/OE.22.000377>
18. *Ellison J.F., Cox G.P., Sutton L.J. et al.* // Proc. SPIE. 2013. V. 8860. P. 88600O.
<https://doi.org/10.1117/12.2023532>
19. *Kuznetsov I.I., Mukhin I.B., Palashov O.V.* // Laser Phys. 2016. V. 26. № 4. P. 045004.
<https://doi.org/10.1088/1054-660X/26/4/045004>

Creation of Composite Optical Elements by Ion Beam Surface Activation Method for Laser Applications

I. I. Kuznetsov^{1, *}, I. B. Mukhin¹, M. R. Volkov¹, O. V. Palashov¹, A. E. Pestov², M. V. Zorina²,
N. I. Chkhalo², M. S. Mikhailenko²

¹*Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

²*Institute for Physics of Microstructure of RAS, Nizhny Novgorod, 603087 Russia*

**e-mail: kuznetsov@ipfran.ru*

A method for creating composite active elements from dissimilar optical materials, which consists in treating surfaces with a beam of heavy argon ions and forming an optical contact bonding between the surfaces, has been implemented and tested. Composite active elements Yb:YAG/YAG and Yb:YAG/sapphire in the geometry of a thin disk are created. The elements are tested in a high average power laser circuit. Laser generation with a differential efficiency of 48% at a power of more than 100 W has been obtained on the Yb:YAG/sapphire element, while the generation efficiency on the Yb:YAG/YAG element is 39%, which is a consequence of more efficient cooling of the active medium through sapphire.

Keywords: high average power laser, disk Yb:YAG laser, composite active elements, roughness, ion-beam etching.