

Подготовка поверхности материалов для создания композитных оптических элементов

© М.В. Зорина,¹ И.И. Кузнецов,² М.С. Михайленко,¹ О.В. Палашов,² А.Е. Пестов,¹ Н.И. Чхало¹

¹ Институт физики микроструктур РАН,
607680 Нижний Новгород, Россия

² Институт прикладной физики РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: aepestov@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 12 апреля 2020 г.

В окончательной редакции 12 апреля 2020 г.

Принято к публикации 12 апреля 2020 г.

Исследовано качество подготовки поверхности различных лазерных материалов с целью создания композитных элементов. Показано, что плоскостность образцов должна быть не хуже чем $\lambda/10$, а шероховатость — не больше 1.0 nm. Найдены параметры ионного травления, которые не приводят к деградации шероховатости — ионы Ar, $E_{ion} = 800$ eV и угол скольжения $\theta = 5^\circ$. Созданы композитные элементы из алюмоиттриевого граната, легированного ионами иттербия (Yb:YAG), а также магнитоактивного кристалла TGG (тербий-галлиевый гранат) с монокристаллами сапфира.

Ключевые слова: шероховатость, ионное травление, алюмоиттриевый гранат, иттербий, монокристаллы сапфира.

DOI: 10.21883/JTF.2020.11.49983.126-20

Введение

Композитные активные элементы открывают широкий простор для развития современных лазерных систем, в частности, для одновременного достижения высокой средней мощности и высокой энергии импульсов. В подавляющем большинстве случаев для создания композитов используется метод термодиффузионной сварки, что существенно ограничивает диапазон доступных материалов веществами с близкими коэффициентами теплового расширения [1]. Особый интерес представляет создание композитных элементов с применением оптических материалов с высокой теплопроводностью, которые послужат для отведения тепла от активной среды (монокристалл сапфира Al_2O_3 , монокристалл карбида кремния SiC, монокристалл искусственного алмаза и т.д.) [2]. Они могут использоваться как в качестве активных элементов мощных лазеров, так и в магнитоактивных изоляторах Фарадея для них [3]. Одной из наиболее популярных лазерных сред сегодня являются кристаллы алюмоиттриевого граната, легированные ионами Yb (Yb:YAG), а наиболее распространенной магнитоактивной средой — кристаллы TGG.

Отдельный интерес представляет создание композитов с многослойным отражающим или антиотражающим покрытием на границе. Наличие отражающего покрытия позволит использовать непрозрачные материалы с высокой теплопроводностью, а антиотражающее покрытие позволит избавиться от потерь излучения на границе материалов с различными показателями преломления.

В настоящей работе описан метод создания композитных элементов из разнородных оптических материалов,

в котором перед посадкой элементов на оптический контакт производится обработка контактных поверхностей пучком энергичных атомов аргона.

1. Активация поверхности ионным пучком

Активация поверхности производится на установке ионно-пучкового травления [4]. Для реализации метода была проведена незначительная модернизация установки, в частности, был изготовлен держатель образцов с шарнирным механизмом. Шарнир представляет собой пару сапфировых элементов — шарик и основание для крепления образцов (шайба). Низкое трение в таком

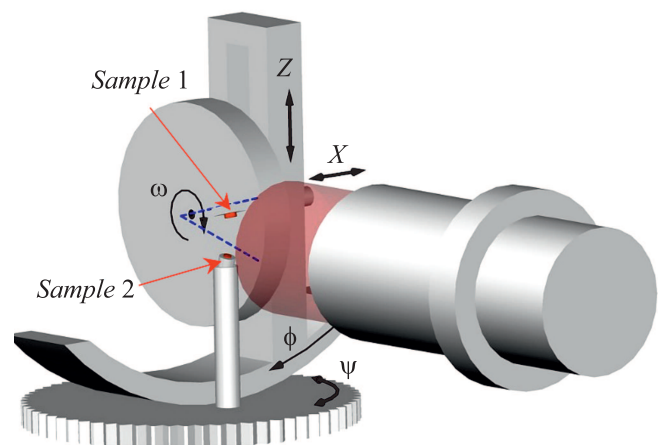


Рис. 1. Схема устройства для ионного травления.

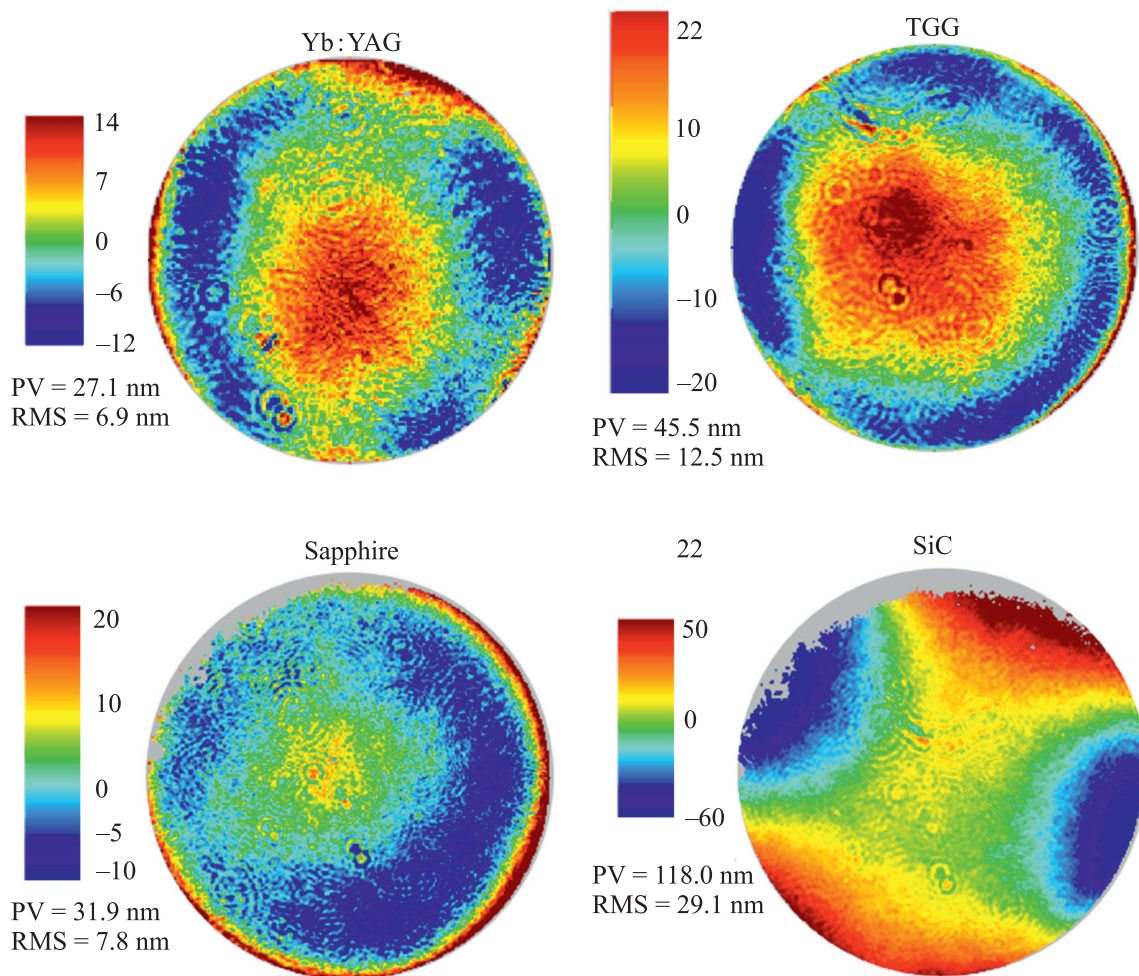


Рис. 2. Результаты измерения плоскостности на образцах из различных материалов.

шарнире облегчает устранение несоответствия углов соединяемых элементов (не происходит закусывание, как в случае применения стали), а его прочность позволяет прикладывать значительное давящее усилие. Таким образом, схема эксперимента выглядит следующим образом (рис. 1).

Образец 1 жестко закрепляется с помощью кронштейна на поворотном столе установки, а образец 2 закрепляется на шарнирном механизме держателя. Оба образца располагаются под одинаковым углом скольжения по отношению к оси ионного пучка, который устанавливается для образца 1 за счет поворота столика, а для образца 2 за счет конструкции держателя.

2. Подготовка поверхности

2.1. Механическая полировка и планаризация

Для создания композитов изготавливались образцы из различных кристаллов (Yb:YAG, TGG, сапфир, SiC). Образцы имели форму дисков с различными аспектными соотношениями, а именно диски из кристалла Yb:YAG

и TGG с диаметром 10 mm и толщиной 2 mm, диски из кристалла сапфира с диаметром 14 mm и толщиной 2 mm и диски из кристалла SiC диаметром 18 mm и толщиной 1 mm. Механическая обработка поверхностей образцов осуществлялась вручную. На часть образцов Yb:YAG наносились многослойные диэлектрические отражающие покрытия, состоящие из 30 слоев оксида кремния и тантала. При этом использовалась установка электронно-лучевого напыления с ионным ассистированием. Контролировались шероховатость и плоскостность обрабатываемых поверхностей. Для измерения плоскостности использовался фазово-сдвиговый интерферометр. Результаты измерения для различных кристаллов приведены на рис. 2.

Плоскостность (максимальный размах высот PV — Peak-to-Valley) на кристаллах Yb:YAG была < 30 nm, на кристаллах TGG < 50 nm, на кристаллах сапфира < 35 nm, что меньше целевого значения плоскостности $< \lambda/10$. Однако для кристаллов SiC на полном диаметре образца плоскостность оказалась 120 nm, а внутри окружности диаметром 10 mm была < 90 nm. Недостаточная плоскостность в этом случае связана со

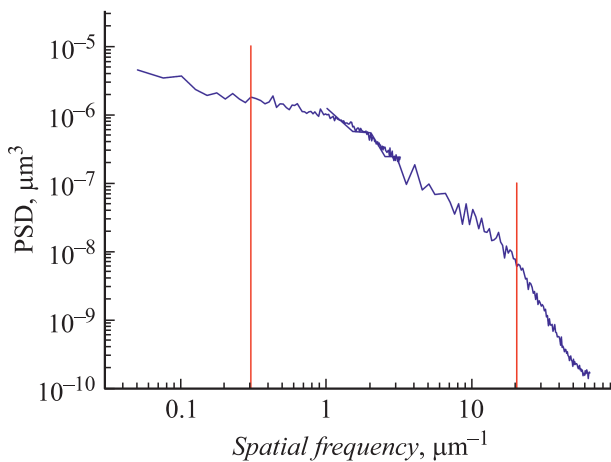


Рис. 3. PSD-функция шероховатости поверхности образца сапфира, построенная по данным АСМ (кадры размером 40×40 и $2 \times 2 \mu\text{m}$). Высокочастотная шероховатость (по кадру $2 \times 2 \mu\text{m}$) составила $\sigma_{2 \times 2} = 0.9 \text{ nm}$; шероховатость (по кадру $40 \times 40 \mu\text{m}$) $\sigma_{40 \times 40} = 1.5 \text{ nm}$; эффективная шероховатость (по всему приведенному диапазону пространственных частот $\nu \in 0.025 - 63.5 \mu\text{m}^{-1}$) $\sigma_{\text{eff}} = 2.2 \text{ nm}$.

слишком малой толщиной образцов, которые изгибались при снятии с подложки.

Шероховатость поверхностей измерялась с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) NTEGRAPrima (NT-MDT). Целевым параметром обработки поверхностей является эффективная шероховатость $< 1 \text{ nm}$. Ожидается, что такие поверхности смогут уверенно „сидеть“ на оптический контакт.

По результатам АСМ измерений восстанавливалась PSD-функция (Power Spectral Density — спектральная плотность мощности) шероховатости — статистическая характеристика поверхности, представляющая собой распределение квадрата амплитуды шероховатости по пространственным частотам,

$$\text{PSD}(\nu) = |\hat{F}[z(\rho)]|,$$

где $z(\rho)$ — высота поверхности в точке, определяемой радиус-вектором ρ , \hat{F} — оператор преобразования Фурье. Типичная кривая PSD-функции представлена на рис. 3.

Для количественного описания качества поверхности кроме PSD-функции вводится понятие эффективной шероховатости, σ_{eff} в некотором диапазоне пространственных частот $\nu \in [\nu_{\text{min}} - \nu_{\text{max}}]$, определяемой с помощью интеграла от PSD-функции:

$$\sigma_{\text{eff}}^2 = \int_{\nu_{\text{min}}}^{\nu_{\text{max}}} \text{PSD}(\nu) d\nu.$$

Как можно видеть из рис. 3, основной вклад в значение эффективной шероховатости вносят дефекты с латеральным размером неоднородности $3 - 0.05 \mu\text{m}$

(диапазон пространственных частот $\nu \in 0.3 - 20 \mu\text{m}^{-1}$ — отмечен на рисунке вертикальными линиями), это — царапины. Тем не менее описываемая методика глубокой шлифовки (полировки) с поэтапным уменьшением зерна полирующего агента позволила получить высококачественную поверхность с шероховатостью $\sim 2 \text{ nm}$.

2.2. Подготовка поверхности ионным пучком

Далее образцы подвергались бомбардировке нейтрализованными ионами Ag при различных параметрах процесса (энергия ионов, время экспозиции, угол скольжения). Затем вновь проводилось изучение шероховатости поверхности с помощью АСМ [5]. В результате было обнаружено, что оптимальным для достижения минимальной шероховатости поверхности является угол 5° от поверхности. Для всех изученных материалов наблюдалось сохранение шероховатости на исходном уровне в области средних пространственных частот, а в области высоких пространственных частот наблюдается значительное сглаживание (рис. 4).

В таблице приведены значения шероховатости поверхности для различных материалов до и после обработки ускоренными ионами Ag с энергией $E_{\text{ion}} = 800 \text{ eV}$ при угле скольжения 5° от поверхности.

Как видно из таблицы, после ионной обработки образцов Yb:YAG, TGG и SiC достигнуты целевые параметры по шероховатости ($\sigma_{\text{eff}} < 1.0 \text{ nm}$); шероховатость сапфира после обработки не измерялась, но ожидается, что она улучшается так же, как и для Yb:YAG и TGG. Образец Yb:YAG с нанесенным на поверхность зеркалом имеет значительно более высокую шероховатость как исходную, так и после ионной обработки по сравнению с Yb:YAG без зеркала.

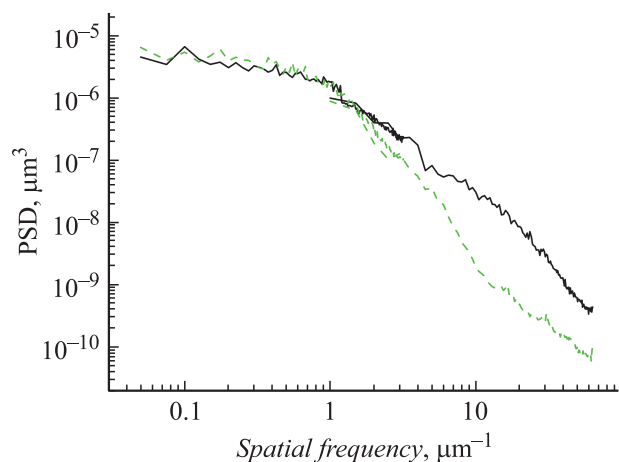


Рис. 4. PSD-функция шероховатости поверхности образца YAG, построенная по данным АСМ (кадры размером 40×40 и $2 \times 2 \mu\text{m}$) до (сплошная линия $\sigma_{2 \times 2} = 0.95 \text{ nm}$, $\sigma_{40 \times 40} = 1.6 \text{ nm}$, $\sigma_{\text{eff}} = 2.4 \text{ nm}$) и после (штриховая линия $\sigma_{2 \times 2} = 0.35 \text{ nm}$, $\sigma_{40 \times 40} = 1.5 \text{ nm}$, $\sigma_{\text{eff}} = 1.6 \text{ nm}$) ионного травления.

Шероховатость образцов до и после ионной обработки

Материал	$\sigma_{\text{ср}}$, nm (исходная)	$\sigma_{\text{ср}}$, nm (после травления)
Yb:YAG	2.3 ± 0.2	1.0 ± 0.2
Yb:YAG (с зеркалом)	3.1 ± 0.3	1.9 ± 0.2
TGG	2.5 ± 0.2	1.2 ± 0.2
Сапфир	2.0 ± 0.2	—
SiC	0.6 ± 0.15	0.7 ± 0.15

3. Создание композитных элементов

С использованием представленного метода успешно созданы композиты Yb:YAG/сапфир и TGG/сапфир. Попытки создания композитов Yb:YAG(с зеркалом)/сапфир и Yb:YAG/SiC не увенчались успехом. При создании композита Yb:YAG/SiC возникла проблема изгиба образца SiC в процессе соединения. После неудачной попытки соединения было обнаружено, что плоскостность поверхности образца необратимо ухудшилась до ~ 300 nm. Данная проблема связана с малой толщиной образца. При этом в экспериментах при креплении образца к подложке использовался эластичный клей, который позволял образцу свободно изгибаться при соединении. В будущем планируется использовать более толстые образцы и/или монтировать их на твердый клей (например, эпоксидную смолу). Отрицательный результат попытки создания кристалла Yb:YAG(с зеркалом)/сапфир, возможно, объясняется слишком большой шероховатостью поверхности с зеркалом. Как видно из таблицы, нанесение покрытия привело к ухудшению шероховатости с 2.3 до 3.1 nm. Для улучшения шероховатости вместо электронно-лучевого напыления можно использовать напыление ионно-лучевое, которое позволяет создавать более плотные слои, что должно приводить к улучшению шероховатости. Другой возможностью улучшения шероховатости поверхности с зеркалом является поиск оптимального угла обработки ионным пучком, что, можно надеяться, позволит достичь субнанометровой шероховатости.

Заключение

В ходе работы было показано, что хорошая плоскостность и низкая шероховатость скрепляемых поверхностей являются решающими факторами для образования устойчивого оптического контакта. Плоскостность должна быть не хуже, чем $\lambda/10$, а эффективная шероховатость — лучше 1 nm.

Исследовано влияние обработки нейтральными ионами Ag на шероховатость поверхностей различных материалов (кристаллов Yb:YAG, TGG, сапфира, SiC и Yb:YAG с диэлектрическим многослойным зеркалом). Обработка пучком при энергии $E_{\text{ion}} = 800$ eV и сколь-

зшем угле 5° не приводит к деградации шероховатости поверхности, более того, для всех материалов наблюдается заметное сглаживание высокочастотной шероховатости (по АСМ кадру $2 \times 2 \mu\text{m}$), что позволяет использовать данный метод для активации поверхности перед „посадкой“ образцов на оптический контакт.

Созданы композитные элементы из широко используемого лазерного материала алюмоиттриевого граната, легированного ионами иттербия (Yb:YAG), а также магнитоактивного кристалла TGG с монокристаллами сапфира. Данные элементы будут в дальнейшем использоваться при создании лазеров высокой мощности и изоляторов Фарадея для них.

Композиты Yb:YAG/SiC и Yb:YAG (с зеркалом)/сапфир создать не удалось. В случае композитов с SiC проблема заключалась в малой толщине кристаллов, приводящей к их изгибу при соединении. Для решения проблемы будут использованы более толстые кристаллы. В случае элементов с зеркалом проблемой являлась большая шероховатость зеркальной поверхности. Возможно, использование ионно-лучевого способа напыления вместо электронно-лучевого позволит улучшить шероховатость.

Финансирование работы

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“ ИФМ РАН и при поддержке гранта РФФИ: 19-02-00631.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Mukhin I., Perevezentsev E., Palashov O. // Opt. Mater. Express. 2014. Vol. 4. P. 266–271.
- [2] Kuznetsov I., Pestov A., Mukhin I., Volkov M., Zorina M., Chkhalo N., Palashov O. // Opt. Lett. 2020. Vol. 45. P. 387–390.
- [3] Yasuhara R., Snetkov I., Starobor A., Mironov E., Palashov O. // Opt. Express. 2016. Vol. 24. P. 15486–15493.
- [4] Chkhalo N.I., Kaskov I.A., Malyshev I.V., Mikhaylenko M.S., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Toropov M.N., Zabrodin I.G. // Precision Engineering. 2017. Vol. 48. P. 338–346.
- [5] Chkhalo N.I., Salashchenko N.N., Zorina M.V. // Rev. Sci. Instrum. 2015. Vol. 86. P. 016102.