

## Структура поверхностного слоя и пропускание света сапфиром после распыления в ВЧ разряде в смеси $H_2-N_2$

© А.Е. Городецкий,<sup>1</sup> Л.А. Снигирев,<sup>2</sup> А.В. Маркин,<sup>1</sup> В.Л. Буховец,<sup>1</sup> Т.В. Рыбкина,<sup>1</sup> Р.Х. Залавутдинов,<sup>1</sup> А.Г. Раздобарин,<sup>2</sup> Е.Е. Мухин,<sup>2</sup> А.М. Дмитриев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, 119071 Москва, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: amarkin@mail.ru

Поступило в Редакцию 15 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 27 мая 2022 г.

Принято к публикации 28 мая 2022 г.

Исследованы изменения в структуре поверхностных слоев и в пропускании света после распыления пластин лейкосапфира с ориентацией ( $c$ - $(0001)$ ) в ВЧ разряде  $90\%H_2-10\%N_2$ . После удаления слоя толщиной около 300 нм (время распыления 12 h)/число царапин, оставшихся после механической полировки, существенно уменьшилось, однако величина среднеквадратичной шероховатости пластины осталась неизменной. Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии, в приповерхностной области толщиной 50–60 нм сформировалась двухслойная структура, состоящая из внешнего 10 нм аморфизированного слоя и внутреннего кристаллического слоя толщиной 40–50 нм с высокой плотностью дефектов. Пропускание света в интервале длин волн 400–1000 нм или несколько возрастало, или оставалось неизменным. Продемонстрированная стабильность светопропускания пластин  $c$ - $(0001)$  при экспозиции в ВЧ разряде в смеси  $90\%H_2-10\%N_2$  позволяет считать рассматриваемую методику очистки перспективной для использования в восстановлении светопропускания защитных окон перед первым зеркалом в диагностике томсоновского рассеяния в строящемся токамаке ИТЭР.

**Ключевые слова:** лейкосапфир, высокочастотный разряд, водород, азот, структура поверхностного слоя, пропускание света, просвечивающая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия.

DOI: 10.21883/JTF.2022.10.53252.108-22

### Введение и постановка задачи

Наряду с проблемой радиационных повреждений в материалах главной камеры в стоящемся экспериментальном реакторе (ИТЭР) и будущем демонстрационном термоядерном реакторе (ДЕМО), существует ряд вопросов, связанных с эрозией первой стенки, сопровождающейся осаждением распыляемого материала на оптические элементы диагностических устройств, расположенных в прямой видимости центральной и диверторной плазмы.

В современных токамаках оптические диагностические системы собирают излучаемый плазмой свет с помощью линз, оптоволоконных световодов и вакуумных окон, размещаемых на корпусе рабочей камеры [1]. В строящемся во Франции международном термоядерном реакторе ИТЭР для сбора света из плазмы предполагается использовать внутривакуумные металлические зеркала (так называемые „первые“ зеркала) [2]. Зеркала будут установлены в специальных диагностических патрубках на сравнительно небольших расстояниях от плазмы.

Для диагностики плазмы дивертора методом томсоновского рассеяния (ДТР) при регистрации рассеянного света в спектральной области 550–1100 нм предпола-

гается использовать зеркало размером  $\sim 20 \times 20$  см<sup>2</sup>. Первое зеркало будет размещено в узком диагностическом канале на расстоянии около 1.3 м от плазмы [3]. Предполагается, что это зеркало может подвергаться значительным тепловым нагрузкам и воздействию потоков нейтральных атомов из плазмы (D, T, Be и W) [4]. Для узла первого зеркала необходимо решить задачи выбора подходящих материалов и технологии изготовления самого зеркала, проработать системы защиты зеркала от неблагоприятных воздействий плазмы и радиации, потоков атомов примесей, в основном бериллия. Конденсируемые на зеркале пленки Be приведут к уменьшению его отражательной способности. В работе [5] рассматривается возможность защиты „первых“ зеркал ДТР-окнами — тонкими пластинами кварца или лейкосапфира [6], отделяющими всю вакуумную оптику от воздействия потоков частиц ядерного топлива и частиц распыляемого материала первой стенки.

Лейкосапфир — синтетический, бесцветный, оптически прозрачный, химически чистый монокристалл ( $\alpha$ - $Al_2O_3$ ). Базисная грань с плоскостью (0001) является наиболее плотноупакованной, высокосимметричной и стабильной поверхностью при изготовлении окон и пластин из лейкосапфира (далее  $c$ -ЛС или ЛС). Во многих оптических приборах использование окон с базисной

ориентацией предпочтительнее по сравнению с окнами, выполненными из кристаллов с призматической ориентацией, из-за максимальной стабильности и отсутствия в них двойного лучепреломления [7,8].

ЛС уступает кварцу КУ-1 по сохранению светопропускания в видимом диапазоне в условиях нейтронного и гамма-облучения [9,10]. Принимая во внимание повышенную механическую прочность, химическую стойкость и высокую теплопроводность ЛС, авторы [6] не исключили возможность его использования как одного из вариантов защитного окна в ДТР. При размещении окна перед первым зеркалом возникает задача разработки технологии его очистки *in situ* от бериллиевых осадков и сопутствующих им загрязнений.

Проблема очистки сапфировых окон от загрязнений существует в самых разнообразных плазменных [11] и высокотемпературных вакуумных установках.

В настоящей работе рассмотрена возможность использования газового высокочастотного (далее ВЧ) разряда для очистки ЛС от конденсируемых на его поверхности загрязняющих пленочных осадков. Можно предположить, что во время очистки из-за неравномерного удаления загрязнений с поверхности ЛС придется некоторое время воздействовать плазмой непосредственно на поверхностный слой сапфирового окна. Поэтому для эффективного и надежного использования ВЧ разряда необходимо проследить за изменением структуры и топографии чистой оптической поверхности в результате достаточно длительного плазменного воздействия и связанным с таким воздействием изменением пропускания света ЛС.

С учетом опытов на токамаках [12–14] в качестве рабочих газов были выбраны смеси изотопов водорода с азотом. Введение азота в диверторную плазму (до 10%) используется для подавления локального перегрева диверторных пластин за счет преобразования большей части потока плазменной мощности в излучение и для распределения тепловой нагрузки на первую стенку по большой площади. Ранее было показано, что добавление азота в водородную плазму чистящего разряда увеличивает скорость распыления металлов [15]. В качестве основного критерия оптической стойкости материала окна был выбран коэффициент пропускания света в рабочем диапазоне длин волн ДТР — 400–1000 nm.

Материаловедческие разработки, выполненные для ИТЭР, могут оказаться полезными и в других областях, например, в оптике и микроэлектронике [16], лазерной технике и приборостроении [17]. В качестве модельного материала ЛС используется при рассмотрении различных вопросов поверхностных явлений, таких как зарождение и рост металлических пленок на подложке [18], контактные явления при изготовлении сплавов  $Al/Al_2O_3$  [19,20], адсорбция [21], трение [22], пропускание и рассеяние света [23] и др.

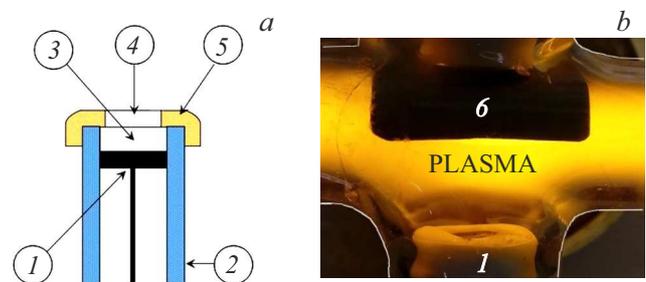
Рассматриваемая в настоящей работе методика ВЧ плазменной очистки в смеси  $H_2-N_2$  может оказаться полезной при формировании низкотемпературных буфер-

ных слоев на сапфировых подложках для дальнейшего осаждения пленок соединений  $A_3B_5$ , например, пленок широко используемого нитрида галлия (GaN) [18,24].

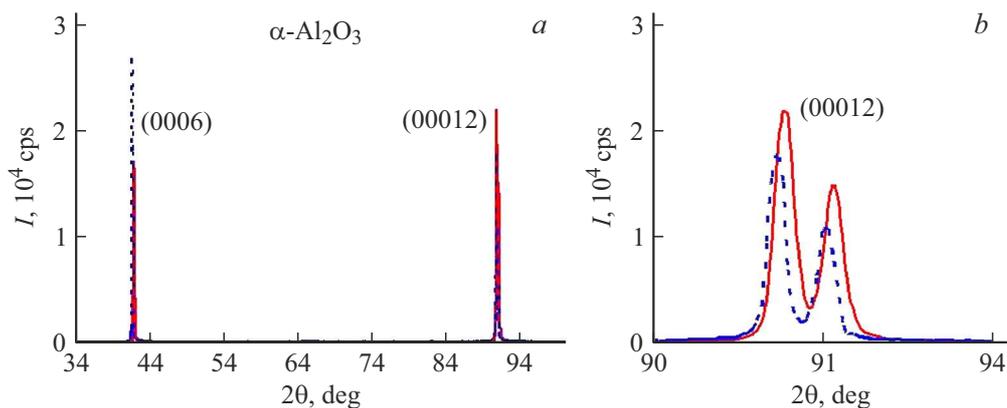
## 1. Методика эксперимента

В предложенной схеме очистки разряд постоянно тока (ПТ) с рабочим током 30 mA между полым катодом и заземленным анодом являлся источником фоновой плазмы в кварцевой трубе диаметром 19 mm и длиной 50 cm. Высокочастотный емкостной разряд формировался между двумя электродами: высоковольтным (ВВ) площадью  $2.27\text{ cm}^2$ , соединенным с ВЧ генератором 13.56 MHz, и заземленным электродом площадью  $10\text{ cm}^2$ . Электроды располагались один напротив другого в центре положительного столба на стенке трубки в направлении, перпендикулярном оси положительного столба разряда. ВЧ генератор (при установленной мощности 50 mW и отраженной мощности 3–4 W) создавал автосмещение  $-300\text{ V}$  на мишени из ЛС, оптически полированной с двух сторон, площадью  $1\text{ cm}^2$  и толщиной 1 mm. Во время опытов температура образца не превышала  $100^\circ\text{C}$ . Подробно схема установки описана в [14,25]. В дополнение к [25] на рис. 1, а приведена схема крепления ЛС на ВВ электроде. На рис. 1, б показано свечение ВЧ разряда вблизи ВВ электрода, на котором крепится пластина ЛС. На фото видно катодное темное пространство, примыкающее к ВВ электроду.

Массовые расходы задавали блоком регуляторов расхода газа: 10.3 и 1.15 ml(s c)/min при нормальных условиях для  $H_2$  и  $N_2$  соответственно. Таким образом, поток  $N_2$  составлял 10% от суммарного потока смеси  $H_2$  и  $N_2$  (далее  $H_2-N_2$ ). Во всех опытах давление поддерживалось равным 15 Pa с помощью дросселирующего вентиля, установленного перед форвакуумным насосом. Определение скорости распыления ЛС осуществляли методом взвешивания образцов на весах Sartorius Ultramicro (с точностью  $0.5\text{ }\mu\text{g}$ ) до и после экспозиции в плазме.



**Рис. 1.** Схема крепления диэлектрического образца на ВВ электроде: 1 — ВВ электрод, 2 — кварцевая трубка, 3 — ЛС пластина  $1 \times 1 \times 0.2\text{ cm}^3$ , 4 — квадратное окно  $0.9 \times 0.9\text{ cm}^2$ , 5 — керамическая крышка-фиксатор образца, заземленный электрод 6 на схеме не показан (а); фото ВЧ разряда в смеси  $H_2-N_2$  в области ВВ электрода: 1 — ВВ электрод с образцом, 6 — заземленный электрод (б).



**Рис. 2.** Дифрактограмма исходной пластины ЛС-1 (1) и пластины ЛС-2, экспонированной в ВЧ разряде (2) в течение 12 h (a); отражение (00012) с разделением компонент  $\alpha$ -дублета  $K_{\alpha 1}$  и  $K_{\alpha 2}$  для излучения  $\text{CuK}_{\alpha}$  (b).

Структуру ЛС изучали с помощью дифракции рентгеновских лучей на отражение (ДРЛО, метод симметричного или зеркального отражения Брэгга–Брентано [26], схема  $\theta-2\theta$ , дифрактометр ДРОН-3, Россия) в медном излучении  $\text{CuK}_{\alpha}$  при одновременном вращении образца вокруг оси, нормальной к поверхности, со скоростью 0.7 rot/s. Образцы были просканированы в области углов рассеяния  $2\theta = 4-100^{\circ}$  с шагом  $0.03^{\circ}$  и временем счета на каждом шаге 3 s. Точность измерения углов составила  $\delta\theta = 0.02^{\circ}$  ( $3.49 \cdot 10^{-4}$  rad). Согласно уравнению Брэгга, относительная ошибка в измерении межплоскостных расстояний равна  $\Delta d/d = \delta\theta \text{ctg } \theta = 3.5 \cdot 10^{-4} \text{ctg } \theta$ .

Обращенное к плазме и противоположное поперечные сечения пластины с-ЛС после длительной экспозиции в разряде исследовали в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) Phillips EM 420 с ускоряющим напряжением 100 keV. Подготовка образцов для ПЭМ проводилась методом шлифовки и полировки с последующим распылением ионами  $\text{Ar}^{+}$  с энергией 4 keV.

Измерение коэффициента пропускания (КП) света производили с помощью стенда, собранного с использованием оптоволоконных компонент производства AVANTES ([www.avantes.com](http://www.avantes.com)). Образец ЛС устанавливался на плоский участок корпуса интегрирующей сферы (AvaSphere-50). Источником света служила галогеновая лампа со стабилизацией мощности (AvaLight-HAL). Коэффициент пропускания ЛС рассчитывался как отношение спектра образца к спектру, измеренному в его отсутствие.

Рельеф и шероховатость поверхности ЛС анализировали с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) „Enviroscope“ (Bruker) в полуконтактном режиме с кремниевым кантилевером радиусом 10 nm, изготовленным фирмой TipsNano (г. Зеленоград). Исследование топографии проводили в нескольких областях площадью  $100 \mu\text{m}^2$  [27].

На всех этапах исследований морфологию исходной и облученной поверхности контролировали с помощью оптического микроскопа (ОМ) Neophot-2, Germany.

Предварительное морфологическое и структурное описание поверхностных слоев исходной оптически полированной пластины было выполнено на пластине ЛС-1. Авторы полагали, что первоначальная структура поверхностных слоев пластин ЛС-2 и ЛС-3, экспонированных в ВЧ разряде, подобна структуре ЛС-1.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

ЛС имеет ромбоэдрическую решетку, принадлежащую к пространственной группе  $R3c$  [16,28]. Такую решетку описывают как с помощью ромбоэдрической, так и гексагональной элементарной ячейки. Решетка ЛС состоит из гексагональных плотно упакованных атомов кислорода, расположенных в одной плоскости перемежающихся с плоскостями из плотно упакованных атомов алюминия. В алюминиевой плоскости 1/3 часть позиций остается вакантной. Поэтому отношение  $\text{Al/O} = 2/3$ . Каждый атом Al окружен 6 атомами кислорода, а каждый атом O четырьмя атомами Al. Вакансии размещаются на так называемых „r“ плоскостях, обеспечивая ЛС возможность раскалываться вдоль этих ромбоэдрических плоскостей. Из-за этого единичная ячейка ЛС выбрана с учетом позиций вакансий Al.

Как показал анализ образцов с помощью ДРЛО, в спектрах исходной пластины ЛС-1 и пластин ЛС-2 и ЛС-3, экспонированных в плазме, присутствовали дифракционные отражения (0006) и (00012) с шириной на половине высоты  $0.14 \pm 0.03^{\circ}$  и  $0.13 \pm 0.03^{\circ}$  соответственно (рис. 2, a). Пиковая интенсивность этих отражений на три порядка превышала интенсивность фонового сигнала.

Размер элементарной ячейки „c“, вычисленный по отражению (00012) (рис. 2, b), при угле  $2\theta = 90.73^{\circ}$  и глу-

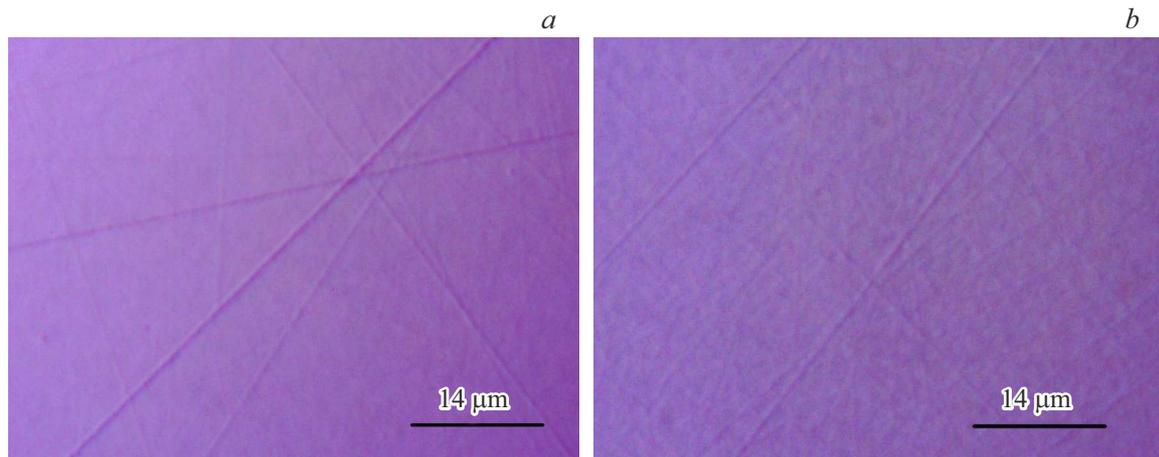


Рис. 3. Поверхности ЛС в ОМ: ЛС-1, исходная (а); ЛС-2 — после экспозиции в ВЧ разряде в смеси  $\text{H}_2\text{-N}_2$  в течение 12 h (b).

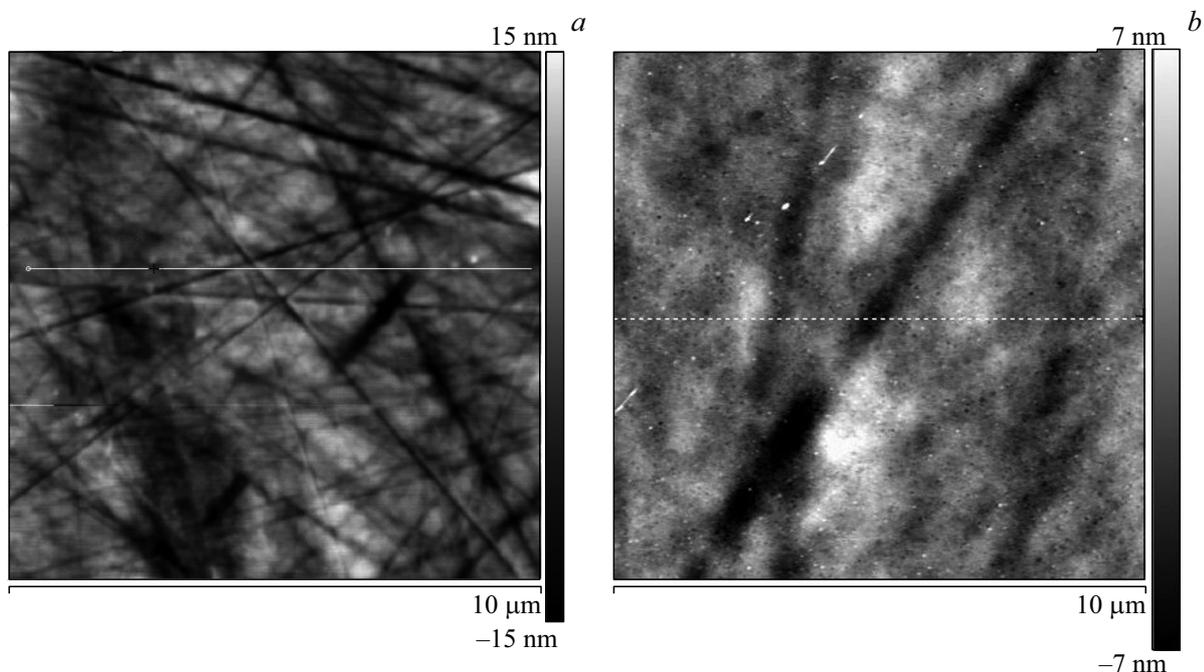


Рис. 4. Топография поверхностей ЛС-1 (а) и ЛС-2, после экспозиции в плазме  $\text{H}_2\text{-N}_2$  в течение 12 h (b).

бине проникновения зондирующего пучка до  $t=100\ \mu\text{m}$  от поверхности оказался равен  $c=(1.2992\pm 0.0005)\ \text{nm}$ . В случае зеркального отражения глубину проникновения определяли как  $t = 4.61 \sin \theta / 2\mu$  [26]. Массовый коэффициент поглощения ЛС вычисляли с учетом массовых коэффициентов алюминия и кислорода, массовых долей элементов  $x_1$  и  $x_2$  в ЛС:

$$\mu/\rho(\text{Al}_2\text{O}_3) = x_1\mu_1/\rho_1(\text{Al}) + x_2\mu_2/\rho_2(\text{O}) = 31.4\ [\text{g}^{-1}\text{cm}^2].$$

Линейный коэффициент поглощения при плотности ЛС  $\rho = 3.97\ \text{g/cm}^3$  оказался равен  $\mu(\text{Al}_2\text{O}_3) = 125\ \text{cm}^{-1}$ .

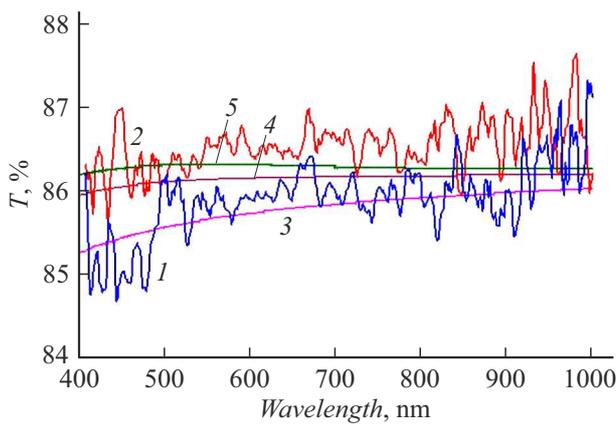
При предварительном просмотре поверхности пластины ЛС-1 в ОМ и АСМ основными дефектами оказались прямолинейные полировочные канавки (рис. 3, а и 4, а)

шириной  $0.5\text{--}1\ \mu\text{m}$  и глубиной от 2 до 10 nm (рис. 4, а), создающие шероховатость  $R_q = 2.4 \pm 0.2\ \text{nm}$ .

Коэффициенты пропускания света в диапазоне длин волн 400–1100 nm исходных пластин с-ЛС при нормальном падении составили 85–86%.

Пластины ЛС-2 и ЛС-3 экспонировали в ВЧ разряде смеси  $\text{H}_2\text{-N}_2$  в течение 12 h. За время распыления ЛС-2 и ЛС-3 были удалены слои массой  $116 \pm 14\ \mu\text{g/cm}^2$ . Скорость распыления оказалась равной  $9.5 \pm 1\ \mu\text{g/cm}^2\text{h}$  или  $24 \pm 3\ \text{nm/h}$ . Толщина удаленных слоев составила  $290 \pm 30\ \text{nm}$ .

После плазмы канавки стали менее контрастными с шероховатыми бортиками. На канавках появились разрывы и перемычки. На участках поверхности между ка-



**Рис. 5.** Коэффициент пропускания пластины ЛС-2 до (1) и после экспозиции в плазме  $\text{H}_2\text{-N}_2$  в течение 12 h (2). Расчетные КП пластины ЛС однородной по толщине плотностью  $3.97 \text{ g/cm}^3$  (3) и пластины с тонкими поверхностными слоями толщиной 50 nm и пониженной плотностью  $3.84$  (4),  $3.80 \text{ g/cm}^3$  (5).

навками появился слабый контраст, вызванный, вероятно, развитием субмикронной шероховатости (рис. 3, b).

В результате плазменной экспозиции в разряде число канавок на АСМ изображении пластины ЛС-2 сократилось, а их ширина увеличилась (рис. 4, b). На канавках появились перемычки протяженностью до  $2 \mu\text{m}$ .

В пластине ЛС-2 КП света в диапазоне длин волн 400–1000 nm увеличился на 0.5–1% по сравнению с первоначальным исходным значением (рис. 5). В пластине ЛС-3 после экспозиции в плазме пропускание света осталось на первоначальном уровне.

Приведенные выше параметры дифракционных пиков до и после плазменного воздействия (рис. 2) свидетельствуют о высоком совершенстве глубинных слоев пластин ЛС, остающиеся неповрежденными в результате длительной экспозиции в чистящем ВЧ разряде. Однако в приповерхностных слоях пластин толщиной до  $1 \mu\text{m}$  структурные изменения были зарегистрированы в ПЭМ.

Визуализация нарушенного слоя пластины ЛС-2 показана на рис. 6.

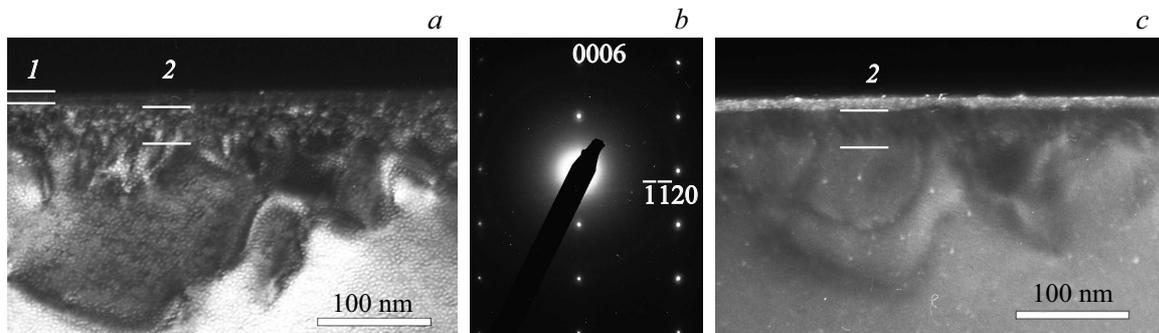
На темнопольном снимке (рис. 6, a) в рефлексе (0006) (рис. 6, b) можно выделить самый верхний, сильно поврежденный и аморфизированный слой 1, толщиной 10 nm. Этот слой выглядит более темным, чем цвет более глубоких слоев кристалла. За тонким слоем 1 располагается кристаллический слой 2, в виде бело-черной области, шириной около 50 nm. Эти же два слоя хорошо видны на рис. 6, c, полученном в темном поле едва заметного кольца, проходящем через рефлекс  $(\bar{1}\bar{1}20)$  на электронограмме (рис. 6, b). В рефлексе дуги указанного кольца слой 1 — светло-серый, а область 2 — темная. Светлые вкрапления в поврежденном слое 1 — нанокристаллиты сапфира размером 2–4 nm.

Слой 2 насыщен дефектами, однако о кристаллическости 50 nm слоя 2 свидетельствует наличие контраста на темнопольных изображениях рис. 6, a и c.

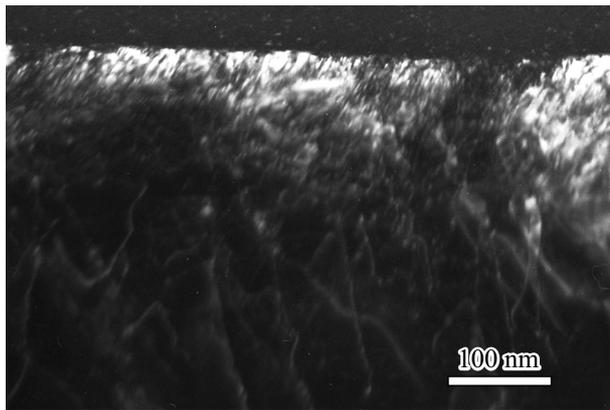
На поперечном сечении противоположной, необлученной стороне пластины аморфный слой отсутствовал (рис. 7). Толщина первичного нарушенного слоя сапфира, образованного при механической полировке, не превышала 300 nm и была сравнима с толщиной слоя материала, распыленного в процессе 12 h плазменной экспозиции. Плотность дислокационных скоплений была ниже, чем плотность дефектов на облученной стороне.

Разумно считать, что наблюдаемый в ПЭМ поверхностный слой 1, обращенный к плазме, сформирован в результате воздействия ускоренных ионов. В описываемых экспериментах энергия атомных и молекулярных заряженных частиц водорода и азота, сталкивающихся с мишенью, варьировалась в интервале от 0 до 300 eV [15]. Согласно расчетам с использованием программы TRIM [29], даже для самых легких ионов  $\text{H}^+$  с максимальной энергией 300 eV, число которых крайне мало, длина пробега не превышала 10 nm. Можно предположить, что аморфный слой 1 был образован в результате торможения внедряемых частиц.

Природа формирования более глубокого слоя 2 с высокой плотностью дефектов неочевидна и требует отдельного изучения.



**Рис. 6.** Поперечное сечение пластины ЛС-2 после экспозиции в разряде в течение 12 h: темнопольное изображение в рефлексе (0006) (a); электронограмма приповерхностного слоя (b); темнопольное изображение в кольце  $(\bar{1}\bar{1}20)$  (c). Ось зоны ориентирована параллельно электронному пучку.



**Рис. 7.** Поперечное сечение необлученного приповерхностного слоя пластины ЛС-2 в рефлексе  $(01\bar{1}2)$ . Ось зоны ориентирована параллельно электронному пучку.

На основании структурного анализа в ПЭМ можно предположить, что из-за высокой концентрации дефектов, усредненная массовая плотность поверхностных слоев 1 и 2 толщиной 50–60 нм несколько меньше плотности исходного ЛС-2.

Суммарное уменьшение массовой плотности может приводить к соответствующему уменьшению показателя преломления, что описывается соотношением Лоренца–Лорентца для так называемой удельной рефракции —  $ref$  [30]:

$$ref = (n^2 - 1)/(n^2 + 2)\rho, \quad (1)$$

где  $n$  — показатель преломления среды при ее плотности  $\rho$ . Величина  $ref$  для данного вещества является константой. Из формулы (1) следует, что при уменьшении  $\rho$  также уменьшается  $n$ .

Расчеты КП пластины с тонким слоем толщиной 50 нм на входной поверхности выполнены с использованием программы Optical [31]. Показатель преломления  $n = 1.77$  для ЛС взят из работы [32]. Изменение КП пластины с верхним 50 нм слоем с плотностью  $\rho = 3.80$  и  $3.84 \text{ g/cm}^3$  представлено на рис. 5. Видно, что при предполагаемых  $\rho$  расчетные спектры пропускания 4 и 5 близки к измеренному спектру 2. Такие величины  $\rho$  соответствуют по формуле (1) показателям преломления  $n = 1.73$  и  $1.745$ .

В этой связи следует отметить, работу [33], в которой было показано, что тонкие аморфные пленки оксинитрида алюминия ( $\text{AlO}_x\text{N}_y$ ) прозрачны на длине волны 550 нм с показателями преломления  $n = 1.65$ – $1.83$  в зависимости от режимов осаждения.

Следует отметить также работу [34], в которой тонкие пористые пленки анодированного оксида алюминия (60 нм), осажденные на кварцевые подложки, уменьшали отражение и увеличивали пропускание видимого света в области 200–900 нм.

Таким образом, после экспозиции в ВЧ разряде в смеси  $\text{H}_2$ – $\text{N}_2$  в оптическом спектре  $c$ -(0001) ЛС проявилась

тенденция к увеличению пропускания в интервале длин волн 400–1000 нм. Анализ структуры пластины показал, что в результате плазменной экспозиции в приповерхностной области толщиной 50–60 нм сформировалась двухслойная композиция, состоящая из внешнего 10 нм аморфизированного слоя и внутреннего, кристаллического слоя толщиной 40–50 нм с высокой плотностью дефектов. Численные оценки светопропускания показали, что экспериментально обнаруженное увеличение пропускания света может быть связано с формированием дефектного слоя толщиной 50 нм, массовой плотностью  $3.8$ – $3.84 \text{ g/cm}^3$  и показателем преломления  $n = 1.73$ – $1.745$ .

## Заключение

После 12-ч экспозиции в ВЧ разряде в смеси  $\text{H}_2$ – $\text{N}_2$  и удалении слоя материала 300 нм оптические спектры  $c$ -ЛС проявили тенденцию к увеличению пропускания в интервале длин волн 400–1000 нм. При значительных изменениях топографии поверхности величина шероховатости пластины  $c$ -ЛС оставалась неизменной  $R_q = 2.5 \text{ nm}$ . Анализ поперечного сечения в ПЭМ пластины  $c$ -ЛС позволил заключить, что в результате плазменной экспозиции поверхностный слой толщиной 10 нм переходит в аморфное состояние. За аморфным слоем располагался дефектный кристаллический слой, толщиной около 50 нм, с высокой плотностью дефектов. Численные оценки показали, что экспериментально обнаруженная тенденция к увеличению пропускания света может быть связана с формированием приповерхностной двухслойной структуры суммарной толщиной 50 нм, средней плотностью  $3.8$ – $3.84 \text{ g/cm}^3$  и показателем преломления  $n = 1.73$ – $1.745$ .

Проведенные опыты позволили заключить, что в рассматриваемом ВЧ разряде в смеси 90% $\text{H}_2$ –10% $\text{N}_2$  сохраняются исходные оптические параметры пластины  $c$ -ЛС. ЛС является перспективным материалом для применения в качестве тонких защитных окон перед первым металлическим зеркалом в установках УТС. Разработанная методика чистки оказывается достаточно перспективной для использования в некоторых рабочих режимах в диверторной области установок УТС. При этом вопросы влияния радиационной повреждаемости ЛС на оптические свойства требуют дополнительной проработки.

Материаловедческие разработки для ИТЭР могут оказаться полезными и при рассмотрении различных вопросов поверхностных явлений, таких как зарождение и рост металлических пленок на подложке, контактные явления при изготовлении сплавов, изучение механизмов трения и др. ВЧ разряд в водороде позволяет формировать поверхности оптических оксидов с регулируемой шероховатостью, восстанавливать тонкие приповерхностные слои оксидов со средним средством к кислороду до металла. При добавлении азота к водороду

с помощью ВЧ разряда появляется возможность модифицирования структуры самых верхних поверхностных слоев и образования в них аморфных и кристаллических оксинитридов.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] В.А. Крупин, Л.А. Ключников, К.В. Коробов, А.Р. Немец, М.Р. Нурғалиев, А.В. Горбунов, Н.Н. Науменко, В.И. Громянов, С.Н. Тугаринов, Ф.В. Фомин. ВАНТ. Сер. термоядерный синтез, **37**(4), 60 (2014). DOI: 10.21517/0202-3822-2014-37-4-60-70)
- [2] A. Litnovsky, V.S. Voitsenya, R. Reichle, M. Walsh, A.G. Razdobarin, A. Dmitriev, N.A. Babinov, L. Marot, L. Moser, R. Yan, M. Rubel, S. Moon, S.G. Oh, P. Shigin, A. Krimmer, V. Kotov, P. Mertens. Nucl. Fusion, **59**(6), 066029 (2019). DOI: 10.1088/1741-4326/ab1446FIP/1-4
- [3] E.E. Mukhin, V.V. Semenov, A.G. Razdobarin, S.Yu. Tolstyakov, M.M. Kochergin, G.S. Kurskiev, K.A. Podushnikova, S.V. Masyukevich, D.A. Kirilenko, A.A. Sinikova, A.E. Gorodetsky, V.L. Bukhovets, R.Kh. Zalavutdinov, A.P. Zakharov, I.I. Arkhipov, Yu.P. Khimich, D.B. Nikitin, V.N. Gorchkov, A.S. Smirnov, T.V. Chernozumskaya, E.M. Khirkevitch, K.Yu. Volkov, P. Andrew. Nucl. Fusion, **52**, 013017 (2012). DOI: 10.1088/0029-5515/52/1/013017
- [4] ITER Technical basis //IAEA/ITER EDA/DS/24. IAEA. Vienna. 2002. 816 p. ITER 2.6. Plasma Diagnostic System in ITER. Technical Basis. G AO FDR 1 01-07-13 R1.0.
- [5] E.E. Mukhin, G.S. Kurskiev, A.V. Gorbunov, D.S. Samsonov, S.Yu. Tolstyakov, A.G. Razdobarin, N.A. Babinov, A.N. Bazhenov, I.M. Bukreev, A.M. Dmitriev, D.I. Elets, A.N. Koval, A.E. Litvinov, S.V. Masyukevich, V.A. Senitchenkov, V.A. Solovei, I.B. Tereshchenko, L.A. Varshavchik, A.S. Kukushkin, I.A. Khodunov, M.G. Levashova, V.S. Lisitsa, K.Yu. Vukolov, E.B. Berik, P.V. Chernakov, A.P. Chernakov, An.P. Chernakov, P.A. Zatilkin, N.S. Zhiltsov, D.D. Krivoruchko, A.V. Skrylev, A.N. Mokeev, P. Andrew, M. Kempnaars, G. Vayakis, M.J. Walsh. Nucl. Fusion, **59**, 086052 (2019). DOI: 10.1088/1741-4326/ab/cd5
- [6] A.G. Razdobarin, N.A. Babinov, A.N. Bazhenov, I.M. Bukreev, A.P. Chernakov, A.M. Dmitriev, D.A. Kirilenko, A.N. Koval, G.S. Kurskiev, S.V. Masyukevich, E.E. Mukhin, D.S. Samsonov, V.V. Semenov, A.A. Sitnikova, V.V. Solokha, S.Yu. Tolstyakov, V.L. Bukhovets, A.E. Gorodetsky, A.V. Markin, A.P. Zakharov, R.Kh. Zalavutdinov, N.S. Klimov, A.B. Putrik, A.D. Yaroshevskaya, P.V. Chernakov, F. Leipold, R. Reichle, C. Vorpahl. MPT/P5-40. *The 26th Fusion Energy Conference* (Kyoto, Japan, 2016)
- [7] M.B. Smith, K.A. Schmid, F. Schmid, C.P. Khattak, J.C. Lambropoulos. Proc. SPIE, **3705** (1999). DOI: 10.1117/12.354611
- [8] Synthetic Sapphire. [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.tydexoptics.com/materials1/for\\_transmission\\_optics/synthetic\\_sapphire/](http://www.tydexoptics.com/materials1/for_transmission_optics/synthetic_sapphire/), свободный. (дата обращения: 22.06.2002)
- [9] S. Yamamoto, T. Shikama, V. Belyakov, E. Farnum, E. Hodgson, T. Nishitani, D. Orlinski, S. Zinkle, S. Kasai, P. Stott, K. Young, V. Zaveriaev, A. Costley, L. DeKock, C. Walker, G. Janeschitz. J. Nucl. Mater., **283–287**, 60 (2000). PII: S0022-3115(00)00157-4
- [10] K. Vukolov, A. Borisov, N. Deryabina, I. Orlovskiy. Fusion Eng. Des., **96–97**, 177 (2015). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.06.153
- [11] K. Iwano, K. Yamanoi, Y. Iwasa, K. Mori, Y. Minami, R. Arita, T. Yamanaka, K. Fukuda, M. John, F. Empizo, K. Takano, T. Shimizu, M. Nakajima, M. Yoshimura, N. Sarukura, T. Norimatsu, M. Hangyo, H. Azechi, B.G. Singidas, R.V. Sarmago, M. Oya, Y. Ueda. AIP Adv., **6**, 105108 (2016). DOI: 10.1063/1.4965927
- [12] L. Casali, E. Fable, R. Dux, F. Ryter. ASDEX Upgrade Team. Phys. Plasmas, **5**, 032506 (2018). DOI: 10.1063/1.5019913
- [13] A. Kallenbach, M. Bernet, R. Dux, L. Casali, T. Eich, L. Giannone, A. Herrmann, R. McDermott, A. Mlynek, H.W. Muller, F. Reimold, J. Schweinzer, M. Sertoli, G. Tardini, W. Treutterer, E. Viezzer, R. Wenninger, M. Wischmeier. ASDEX Upgrade Team. Plasma Phys. Control. Fusion, **55**, 124041 (2013). DOI: 10.1088/0741-3335/55/12/124041
- [14] F. Schluck. Plasma Res. Express, **2**, 015015 (2020). DOI: 10.1088/2516-1067/ab7c2e
- [15] V.L. Bukhovets, A.E. Gorodetsky, R.Kh. Zalavutdinov, A.V. Markin, L.P. Kazansky, I.A. Arkhipushkin, A.P. Zakharov, A.M. Dmitriev, A.G. Razdobarin, E.E. Mukhin. Nucl. Mater. Energy, **12**, 458 (2017). DOI: 10.1016/j.nme.2017.05.002
- [16] E.R. Dobrovinskaya, L.A. Litvinov, V. Pishchik. *Sapphire. Material, Manufacturing, Applications* (Springer, 2009), 500 p.
- [17] S.P. Malyukov, Yu.V. Klunnikova. In: *Nano- and Piezoelectric Technologies, Materials and Devices* (Nova Science Publishers, 2013), p. 133–150.
- [18] J. Kim, Y.Ju. Park, D. Byun, E.K. Kim, E.K. Koh, W. Pard. J. Kor. Phys. Soc., **42**(2), S446 (2003).
- [19] Ю.В. Найдич. *Контактные явления в металлических расплавах* (Наукова думка, Киев, 1972), 195 с. [J.V. Naidich. Progr. Surf. Membr. Sci., **14**, 353-483 (1981).]
- [20] С.В. Гавриш, В.В. Логинов, С.В. Пучинина. Успехи прикладной физики, **7**(5), 480 (2019).
- [21] J. Sung, L. Zhang, Ch. Tian, Gl.A. Waychunaas, Y. Ron Shen. J. Am. Chem. Soc., **133**, 3846 (2011). DOI: 10.1021/ja104042u
- [22] А.В. Волошин, Е.Ф. Долженкова, Л.А. Литвинов. Сверхтвердые материалы, **5**, 62 (2015).
- [23] C.J. Lasmier, L.G. Sepalla, K. Morris, M. Groth, J. Fenstermacher, S.L. Allen, E. Synakowski, J. Ortiz. *Visible and Infrared Optical Design for the ITER Upter Ports* (UCRL-TR-228629, 2007), 93 p.
- [24] P.V. Parphenyuk, A.A. Evtukh. Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron., **199**(1), 1 (2016). DOI: 10.15407/speqeo19.01001.
- [25] А.Е. Городецкий, В.Л. Буховец, А.В. Маркин, В.И. Золотаревский, Р.Х. Залавутдинов, Н.А. Бабинов, А.М. Дмитриев, А.Г. Раздобарин, Е.Е. Мухин. ЖТФ, **91**(2), 299 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.02.50366.180-20 [A.E. Gorodetskii, A.V. Markin, V.L. Bukhovets, V.I. Zolotarevskiy, R.Kh. Zalavutdinov, N.A. Babinov, A.M. Dmitriev, A.G. Razdobarin E.E. Mukhin. Tech. Phys., **66**(2), 288 (2021). DOI: 10.134/S1063784221020122]

- [26] T. Mitsunaga. *The Rigaku J.*, **25** (1), 7 (2009).
- [27] T. Jacobs, T. Junge, L. Pastewka. *Surf. Topogr. Metrol. Properties*, **5** (1), 013001 (2017).  
DOI: 10.1088/2051-672X/aa51f8
- [28] F. Cuccureddu, S. Murphy, I.V. Shvets, M. Porcu, H.W. Zandbergen, N.S. Sidorov, S.I. Bozhko. *Surf. Sci.*, **604** (15), 1294 (2010). DOI: 10.1016/j.sucs.2010.04.017
- [29] J.P. Biersack, L. Haggmark. *Nucl. Instrum. Meth.*, **174**, 257 (1980).
- [30] R.K. Krishnaswamy, J. Janzen. *Polym. Test.*, **24** (6), 762 (2005). DOI: 10.1016/j.polymertesting.2005.03.010
- [31] E. Centurioni. *Appl. Opt.*, **44** (35), 7532 (2005).  
DOI: 10.1364/AO.44.007532
- [32] I.H. Malitson. *J. Opt. Soc. Am.*, **52** (12), 1377 (1962).
- [33] C.K. Hwangbo, L.J. Ling, J.P. Lehan, H.A. Macleod, F. Saits. *Appl. Opt.*, **28** (14), 2779 (1989).  
DOI: 10.1364/AO.28.002779
- [34] H. Zhuo, F. Peng, L. Lin, Y. Qu, F. Lai. *Thin Solid Films*, **519**, 2308 (2011). DOI: 10.1016/j.tsf.2010.11.024