

АНИЗОТРОПИЯ РАСПЫЛЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛА САПФИРА

K. Ф. Миннебаев, K. A. Толпин, B. E. Юрасова*

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
119991, Москва, Россия

Поступила в редакцию 13 января 2015 г.

Экспериментально исследовано пространственное распределение частиц, распыленных с базисной грани (0001) монокристалла сапфира с тригональной кристаллической решеткой ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), которую можно представить как наложение двух ГПУ-решеток: идеальной для кислорода и несколько деформированной для алюминия. Обнаружено, что выход распыленных частиц с базисной плоскости сапфира происходит в основном по сторонам неправильного шестиугольника с пятнами на его вершинах. Изучены картины пятен при распылении частиц с грани (0001) цинка — монокристалла с ГПУ-решеткой. Пятна распыления цинка расположены на вершинах нескольких концентрических равносторонних шестиугольников. И в том, и в другом случае наблюдаемая анизотропия распыления связана с фокусированными соударениями (прямая и дополнительная фокусировка) и с процессом канализации. Исследован химический состав картин пятен сапфира в различных участках напыленного осадка. Проведено обсуждение результатов и сравнение их с данными, полученными нами ранее для вторичной ионной эмиссии из монокристалла $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

DOI: 10.7868/S0044451015080076

1. ВВЕДЕНИЕ

Распыление вещества под действием бомбардирующих ионов представляет собой сложный процесс и сопровождается многими дополнительными явлениями, затрудняющими его изучение. Несмотря на то что к настоящему времени накоплен обширный материал по исследованию распыления [1–4], еще нет полной ясности в понимании его механизма.

На первой стадии исследования распыления, начиная с его открытия в 1853 г. [5], ионная бомбардировка проводилась в плазме газового разряда и только для поликристаллических образцов. При этом пространственное распределение эмитированных частиц получалось изотропным, и процесс распыления объяснялся испарением вещества из локальных участков поверхности, расплавленных вследствие ионной бомбардировки [6].

Такой механизм был отвергнут после работы Венера [7], в которой он впервые исследовал распыление монокристалла и обнаружил анизотропное пространственное распределение распыленных частиц из монокристалла меди. Он показал, что эмиссия

атомов наиболее интенсивно происходит в плотноупакованных кристаллографических направлениях, если энергия бомбардирующих ионов не превышает 200–300 эВ. При более высоких энергиях ионов Венер уже не наблюдал анизотропию распыления и предположил, что в этом случае действует механизм испарения.

Это предположение не подтвердилось, поскольку далее в работах [8, 9] было обнаружено преимущественное распыление монокристаллов в плотноупакованных направлениях при бомбардировке ионами с энергией до 5 кэВ. Для монокристалла меди преимущественное распыление наблюдалось в плотноупакованных направлениях $\langle 110 \rangle$ и в направлениях $\langle 100 \rangle$, следующих за ними по плотности упаковки (рис. 1). Таким образом, было доказано, что распыление в области средних энергий ионов тоже существенно отличается от испарения.

В работах [10–12] была развита теория, объясняющая анизотропию распыления монокристаллов эффективной передачей импульса от падающих ионов атомам мишени путем фокусированных соударений (прямая и дополнительная фокусировка). Помимо этого, было показано, что в формировании пространственного распределения распыленных частиц играет роль преимущественная эмиссия частиц по от-

*E-mail: yurasova@physics.msu.ru

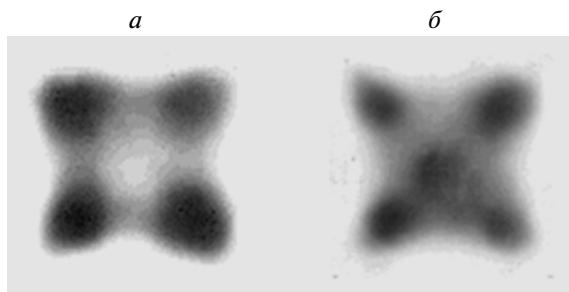


Рис. 1. Картина пятен распыления грани (001) монокристалла меди. Облучение ионами Kr^+ с энергией $E_0 = 300$ эВ (а), $E_0 = 1000$ эВ (б) [9]

крытым каналам кристаллической решетки [13–15]. Именно это явление — «плоскостное канализование» — обуславливает появление широких полос на рис. 1, соединяющих основные пятна.

В последующем анизотропия распыления монокристаллов с ГЦК-решеткой наблюдалась при еще больших энергиях облучающих ионов — до 50 кэВ [16] и даже до сотни килоэлектронвольт [17, 18]. Максимумы распыления в плотноупакованных направлениях (картины пятен) были получены, кроме того, для кристаллов с ОЦК- и ГПУ-решетками [19, 20–22], а также для бинарных соединений [19, 23].

Упомянутые работы по анизотропии распыления явились отправной точкой для дальнейшего изучения физики процесса и вошли в классику мировой литературы по радиационным эффектам в твердых телах [1–4, 18].

Представляло интерес исследовать анизотропию пространственного распределения распыленных частиц для кристалла более сложной структуры, например, тригональной. В настоящей работе такое исследование было проведено для грани (0001) монокристалла сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), имеющего широкое практическое применение [24, 25]. Монокристаллический сапфир используется в лазерах, служит основой в производстве ЖК-мониторов и телевизоров. Подложки из сапфира являются основой белых и голубых светодиодов для освещения, а сапфировые стекла используются на объективах и кнопках, позволяющих идентифицировать владельца по отпечатку пальца. Преобразователи из сапфира работают, кроме того, в системах автоматического контроля, регулирования и управления целым рядом технологических процессов.

Кристаллическую структуру сапфира с тригональной решеткой можно представить как наложен-

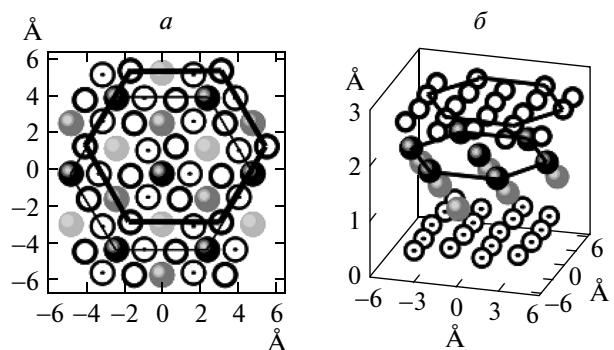


Рис. 2. Кристаллическая структура сапфира тригональной α -модификации: а — грань (0001); б — объемное представление. Белые кружки (пустые и с точками) — кислород (слои 1 и 4); черные, темносерые и светлосерые кружки — алюминий, слои 2, 3 и 5. Шестиугольниками отмечен выход на базисную плоскость ГПУ-решеток: правильной для кислорода и деформированной для алюминия

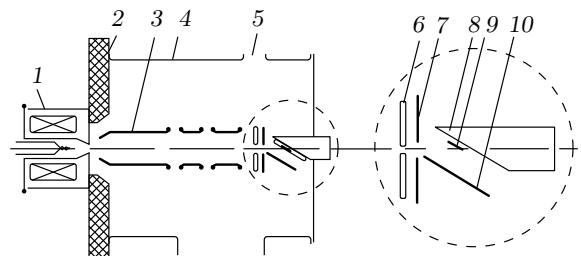


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 — ионный источник; 2 — изолятатор; 3 — одиночная электростатическая линза; 4 — контейнер; 5 — смотровое окно; 6 — кварцевый экран; 7, 10 — стеклянные коллекторы; 8 — медный держатель; 9 — монокристалл сапфира или цинка

ние двух ГПУ-решеток: идеальной для кислорода и несколько деформированной с пустотами для алюминия. Это было показано в работах [26, 27] и изображено на рис. 2.

В связи с приведенным строением сапфира, было интересно вначале исследовать картину пятен распыления кристалла с ГПУ-решеткой. В качестве такого кристалла в настоящей работе был выбран цинк.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проводился на установке, схема которой показана на рис. 3. Использовался источник

ионов Арденне [28], усовершенствованный в [29]. Ионная пушка позволяла получать хорошо сфокусированные пучки ионов аргона с током до 1 мА при ускоряющем напряжении в 10 кВ. Вакуум в рабочей камере во время экспериментов был $2 \cdot 10^{-7}$ мбар. Ионный пучок после ускорения и фокусировки одиночной электростатической линзой проходил сквозь отверстие в кварцевом экране и попадал на образец, который закреплялся на держателе. Перед образом параллельно его распыляемой поверхности помещался плоский коллектор, на который осаждались частицы распыленного вещества при нормальном ($\alpha = 0$) или наклонном падении ионного пучка. Коллектор представлял собой стеклянный диск с отверстием диаметром $d = 3.5$ мм для пропускания ионного луча. Расстояние между распыляемой плоскостью и коллектором выбиралось от 14 до 18 мм. Размеры распыляемой поверхности не ограничивались диафрагмой. В ряде случаев использовался также стеклянный цилиндрический коллектор (с внутренним диаметром 17 мм), который закреплялся на плоском держателе так, чтобы распыляемый монокристалл находился в центре цилиндра. Экспериментально подбирались время t распыления и плотность j ионного тока, необходимые для получения достаточно четких и контрастных картин пятен при визуальном наблюдении. Время t обычно составляло 1 ч для цинка и порядка 10 ч и более для сапфира, коэффициент распыления которого очень мал. По данным, приведенным в [1, 4], при нормальном падении ионов Ar с энергией $E_0 = 5$ кэВ коэффициент распыления составлял $Y = 0.72$ ат./ион для сапфира, $Y = 13.2$ ат./ион для цинка и $Y = 2.1$ ат./ион для алюминия.

Лучшее разрешение изображений картин пятен получалось, когда при фотографировании за коллектор вставлялся лист бумаги.

Анализ химического состава картин распыления проводился методом рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) на приборе Hitachi S-3400N Variable Pressure SEM при энергии первичных электронов 10 кэВ и токе электронного зонда 1 нА.

3. МОДЕЛЬ РАСЧЕТА

Для расчета распыления Al_2O_3 использовалась модель молекулярной динамики [30] с подвижным монокристаллическим блоком атомов в полубесконечной среде [31–33]. Поскольку процесс распыления атома протекает в течение очень короткого вре-

мени (порядка 10^{-13} с с момента удара иона [34]), нестабильность блока атомов не успевала проявиться. Уравнения движения интегрировались по модифицированной схеме Эйлера предиктор–корректор, которая является стабильной [34, 35]. Неупругие потери рассчитывались по формуле Фирсова [36]. Использовался потенциал взаимодействия Борна–Майера с константами из работы [37]. Постоянная решетки и энергия связи атомов брались из экспериментальных данных [38].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

4.1. Картина пятен распыления грани (0001) цинка

Подробная картина пятен распыления была получена для базисной плоскости (0001) монокристалла цинка с параметрами кристаллической решетки $a = 2.66 \text{ \AA}$ и $c = 4.95 \text{ \AA}$.

Картина осадка на плоском стеклянном коллекторе, образованная в результате распыления грани (0001) монокристалла цинка, представлена на рис. 4а. Четко видна система пятен в вершинах нескольких концентрических равносторонних шестиугольников, отражающая симметрию грани (0001) Zn. Пятна расположены под полярными углами выхода $\varphi = 32^\circ$ и $\varphi = 51^\circ$ от нормали к поверхности в плоскостях $\{11\bar{2}0\}$ и соответствуют направлениям выхода $\langle 2\bar{2}03 \rangle$ и $\langle 4\bar{4}03 \rangle$, показанным на рис. 4б. Кроме того, присутствует пятно при $\varphi = 27^\circ$ в направлениях $\langle 11\bar{2}3 \rangle$ в плоскостях $\{10\bar{1}0\}$ и при $\varphi = 0$ в направлении $[0001]$ (видно лишь частично из-за отверстия в коллекторе для прохождения ионного луча).

Наибольшее распыление происходит в направлениях $\langle 2\bar{2}03 \rangle$ ($\varphi = 32^\circ$), в которых наблюдаются самые интенсивные пятна осадка (рис. 4а). Они возникают благодаря парным соударениям вблизи поверхности по механизму Лемана–Зигмунда [2]. Образование пятен в направлениях $\langle 4\bar{4}03 \rangle$, $\varphi = 51^\circ$ (пятна в вершинах большого шестиугольника) происходит по тому же механизму, а в направлении $[0001]$, $\varphi = 0$ — с помощью дополнительной фокусировки соударений [1, 3, 18].

Интенсивность пятен на рис. 4а слабее в направлениях, соответствующих большим углам выхода распыленных частиц. Это связано, как с увеличением расстояния от поверхности образца до участка плоского коллектора, так и с меньшим коэффициентом распыления в этих направлениях. Последнее не

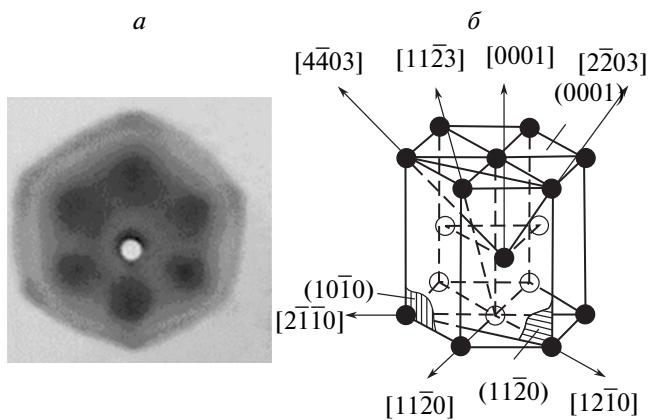


Рис. 4. а) Картина пятен распыления грани (0001) цинка. Облучение ионами Ar^+ с энергией $E_0 = 5 \text{ кэВ}$; $j = 0.5 \text{ mA/cm}^2$, $t = 1 \text{ ч}$. б) Схема гексагональной решетки цинка и направлений преимущественного распыления

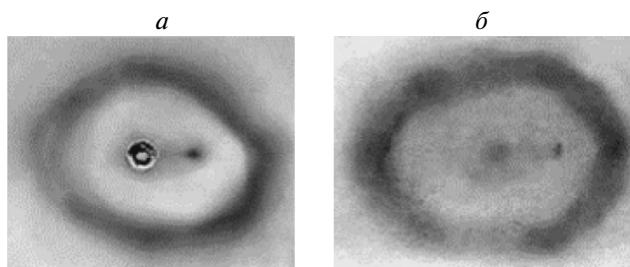


Рис. 5. Картина пятен распыления грани (0001) сапфира: а — для нарушенной предварительным ионным облучением поверхности; б — для первоначально ненарушенной поверхности. Облучение ионами Ar^+ с энергией $E_0 = 10 \text{ кэВ}$; $j = 0.5 \text{ mA/cm}^2$, $t = 9 \text{ ч}$

касается пятна в направлении [0001], которое находится на самом малом расстоянии до коллектора.

Помимо пятен осадка на рис. 4а видны полосы, соединяющие их. Они обусловлены плоскостным канализированием [15] — выходом распыленных частиц по каналам между наиболее открытыми плоскостями, такими как {0001}, {1123}. Заметим, что подобные полосы на картинах распыления, возникающие за счет плоскостного канализирования, наблюдались ранее для монокристаллов с ГЦК-решеткой (см. рис. 1).

4.2. Направления преимущественного распыления грани (0001) сапфира

Исследовались пространственные распределения частиц, распыленных с базисной плоскости монокристалла $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ тригональной системы с постоянными кристаллической решетки $a = 4.76 \text{ \AA}$, $c = 12.99 \text{ \AA}$. Картина пятен для частиц, распыленных с грани (0001) сапфира показана на рис. 5. Поскольку пленки сапфира почти прозрачные, для большей четкости картины образцы облучались достаточно долго, а фотографирование проводилось с повышенным контрастом. Распределения были получены как для образца, который ранее долго облучался, вследствие чего поверхность его была нарушена, так и для предварительно ненарушенной поверхности. Хотя основные направления и плоскости преимущественного выхода распыленных частиц были одними и теми же, картины пятен несколько различались в этих случаях.

Как видно на рис. 5, выход распыленных частиц происходит в основном по сторонам неравностороннего шестиугольника с пятнами на его вершинах, в отличие от характерной картины для цинка, когда система пятен наблюдалась в вершинах нескольких концентрических равносторонних шестиугольников (см. рис. 4а). Для сапфира наиболее плотные пятна распыления расположены на сплошной полосе под углом вблизи $\varphi \approx 60^\circ$. Они соответствуют направлению $\langle 4\bar{4}03 \rangle$ для кристаллов с ГПУ-решеткой.

Расчет показал, что эти направления, несмотря на неравномерное расположение атомов алюминия и кислорода вдоль открытых каналов кристаллической решетки, характеризуются благоприятными условиями передачи импульса облучающими ионами атомам образца. В результате в таких направлениях образуются плотные пятна распыления. Сплошная полоса на рисунке возникает так же, как и в случае распыления цинка, благодаря процессу плоскостного канализования.

На рис. 5 заметны, кроме того, и другие пятна, расположенные внутри центральной почти треугольной области эмиссии, концентрической с основной шестиугольной полосой. Это слабое пятно вблизи центрального направления [0001] и менее четкие пятна малого размера при $\varphi \approx 0, 27^\circ, 45^\circ$. (Для наблюдения центрального пятна отверстие для прохождения ионного пучка было смешено, рис. 5б.) Схема выхода частиц при распылении грани (0001) сапфира показана на рис. 6.

Для того чтобы увидеть преимущественное распыление частиц при больших углах выхода, был ис-

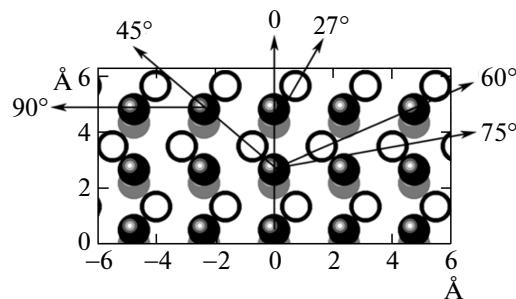


Рис. 6. Элемент грани (11 $\bar{2}0$) тригональной решетки сапфира и преимущественные направления распыления. Положения атомов кислорода в первом ряду (белые кружки) и атомов алюминия во втором (черные) и третьем (серые) рядах

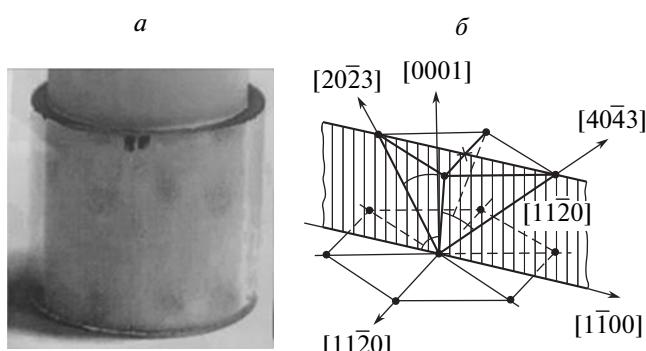


Рис. 7. а) Пятна распыления на цилиндрическом коллекторе при облучении ионами Ar^+ ($E_0 = 10$ кэВ) грани (0001) сапфира ($j = 0.30$ мА/см 2 , $t = 8$ ч). б) Схема преимущественных направлений распыления ГПУ-кристалла (например, для цинка)

пользован цилиндрический стеклянный коллектор, окружающий образец.

Результат осаждения распыленных с грани (0001) сапфира частиц на цилиндрический коллектор представлен на рис. 7 вместе со схемой преимущественных направлений распыления кристалла с ГПУ-решеткой. Облучение образца, показанного на рис. 7a, проводилось с меньшей дозой, чтобы уменьшить плоскостное канализование и лучше различить отдельные пятна.

На цилиндрическом коллекторе (рис. 7a) виден ряд пятен, расположенных через 30° или 60° друг от друга по азимутальному углу γ при полярных углах выхода $\varphi \approx 90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ$. Пятна при $\varphi \approx 90^\circ$ образуются благодаря распылению частиц в плотноупакованных направлениях $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ по

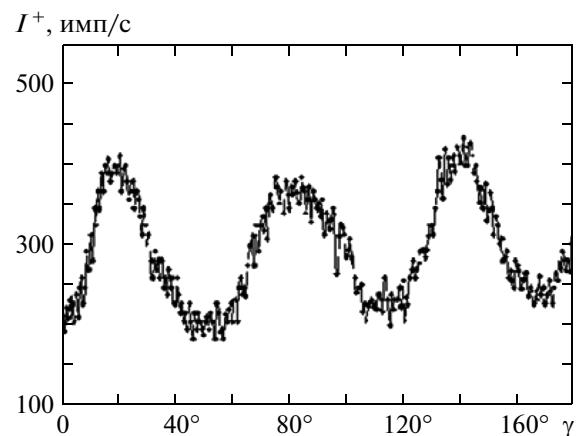


Рис. 8. Азимутальное угловое распределение ионов Al^+ , выходящих с грани (0001) сапфира под полярным углом наблюдения $\varphi = 45^\circ$ [39] ($E_0 = 10$ кэВ, $\alpha = 0$)

механизму дополнительной фокусировки. Рассмотрение показало, что распыление частиц под углом $\varphi \approx 75^\circ$ происходит вследствие преимущественной эмиссии атомов Al по открытым каналам кристаллической решетки, ограниченным цепочками атомов O в плотноупакованных направлениях $\langle 10\bar{1}\bar{0} \rangle$. При углах $\varphi \approx 45^\circ, 60^\circ$ лежат пятна, которые были и на плоском коллекторе. Пятна при $\varphi \approx 60^\circ, 45^\circ, 27^\circ$ характеризуются благоприятными условиями передачи импульса облучающими ионами атомам мишени, несмотря на неравномерное расположение атомов Al и O вдоль них.

Представляло интерес сравнить картины пятен распыления сапфира с азимутальным угловым распределением вторичной эмиссии ионов Al^+ с грани (0001) Al_2O_3 , полученным нами ранее [39] и показанным на рис. 8. Видно, что максимумы вторичной ионной эмиссии алюминия в азимутальном распределении наблюдаются при полярном угле $\varphi = 45^\circ$ с интервалом в 60° . Они соответствуют направлениям выхода $\langle 2\bar{2}03 \rangle$ и пятнам распыления Al_2O_3 на рис. 5 и 7. Таким образом, в пределах исследованных углов эмиссии, полученные данные для картин пятен нейтральной и заряженной компонент распыления полностью совпадают.

4.3. Состав осадка при распылении грани (0001) сапфира

Поскольку картины распыления осаждались на стеклянный коллектор, состоящий в основном из

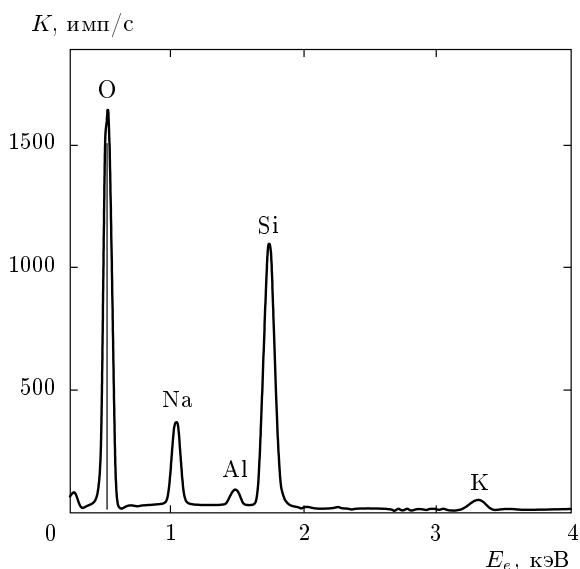


Рис. 9. ЭДС-спектр осадка на стеклянном коллекторе, полученный при распылении грани (0001) сапфира для участка с наибольшим содержанием алюминия (E_e — энергия электронов)

SiO_2 с примесью оксида натрия, в анализированном химическом составе было значительное количество кислорода, относящегося к коллектору. Поэтому при анализе состава картин пятен всегда происходило определение состава самих коллекторов.

Пример ЭДС-спектра осадка на стеклянном коллекторе, полученного при ионном облучении грани (0001) Al_2O_3 , показан на рис. 9 для плотного пятна, расположенного на сплошной полосе под углом эмиссии $\varphi \approx 60^\circ$. Полупрозрачность напыленного осадка (как и самого сапфира) дает основание предположить, что в процессе распыления эмитируют не только атомарные частицы Al и O, но и молекулярные комплексы, что характерно для кристаллов с ионно-ковалентной связью [40]. При этом в плотных пятнах осадка, как показал результат химического анализа состава картин пятен, присутствует некоторое избыточное количество алюминия, что, возможно, связано с распылением частиц Al, как из сапфира, так и из островков Al на его поверхности [41].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдалось угловое распределение частиц, распыленных с грани (0001) сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Картина распыления на плоском коллекторе состояла

из неправильного шестиугольника с пятнами на его вершинах при углах выхода $\varphi \approx 60^\circ$ и центральной треугольной области с пятнами при $\varphi \approx 0, 27^\circ, 45^\circ$. На цилиндрическом коллекторе пятна распыления видны при $\varphi \approx 90^\circ$ и $\varphi = 75^\circ$.

Показано, что большинство направлений преимущественного распыления сапфира (при $\varphi \approx 60^\circ, 45^\circ, 27^\circ$) характеризуется благоприятными условиями передачи импульса от облучающих ионов к атомам мишени, несмотря на неравномерное расположение атомов Al и O вдоль них. Пятна при $\varphi \approx 90^\circ$ образуются благодаря эмиссии частиц в плотноупакованных направлениях $\langle 11\bar{2}0 \rangle$, при $\varphi \approx 75^\circ$ — вследствие выхода атомов Al по каналам, ограниченным цепочками атомов O в направлениях $\langle 11\bar{2}3 \rangle$, а при $\varphi \approx 0$ — за счет дополнительной фокусировки в направлении [0001].

Картинам пятен распыления сапфира сравнивались с полученным детальным пространственным распределением частиц, распыленных с базисной грани монокристалла цинка, близкой по своему строению к такой же грани сапфира. Для Zn наблюдалась картина осадка, состоящая из трех шестиугольных сплошных полос с пятнами при полярных углах выхода $\varphi = 27^\circ, 32^\circ, 51^\circ$, соответствующих эмиссии в направлениях $\langle 11\bar{2}3 \rangle, \langle 2\bar{2}03 \rangle, \langle 4\bar{4}03 \rangle$, и центрального пятна в направлении [0001]. Сплошные полосы образованы вследствие плоскостного канализирования, а пятна — благодаря поверхностным процессам соударений и фокусировки.

Проведено сравнение картины пятен распыления монокристалла сапфира с азимутальным угловым распределением, полученным ранее для вторичной эмиссии ионов Al^+ с грани (0001) Al_2O_3 . Показано, что в пределах исследованных углов эмиссии полученные данные для картин пятен нейтральной и заряженной компоненты распыления полностью совпадают.

Выдвинуто предположение, что в процессе распыления Al_2O_3 эмитируют не только компоненты соединения, но и молекулярные комплексы, что характерно для кристаллов с ионно-ковалентной связью. При этом в плотных пятнах напыленного осадка, как показал результат химического анализа, присутствует избыточное количество алюминия, что, возможно, связано с эмиссией атомов Al как из самого сапфира, так и из островков Al на его поверхности.

Полученные закономерности представляют интерес не только для понимания механизма распыления соединения Al_2O_3 , но и для развития методов анализа поверхности ионными пучками, а также для технологии изготовления тонких пленок.

Авторы благодарят РФФИ (грант № 15-02-07819A) за поддержку работы, а К. Д. Форда — за помощь при анализе химического состава пятен распыления сапфира.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Плещивцев, *Катодное распыление*, Атомиздат, Москва (1968).
2. *Sputtering by Particle Bombardment III*, ed. by R. Behrisch and K. Witmaack, Springer-Verlag, Berlin (1991).
3. В. Е. Юрасова, *Взаимодействие ионов с поверхностью*, ПримАВ, Москва (1999).
4. *Sputtering by Particle Bombardment IV*, ed. by R. Behrisch and W. Eckstein, Springer-Verlag, Berlin (2007).
5. W. R. Grove, Phil. Mag. **5**, 203 (1853).
6. Н. Д. Моргулис, УФН **28**, 202 (1946).
7. G. K. Wehner, J. Appl. Phys. **26**, 1056 (1955); Phys. Rev. **102**, 690 (1956).
8. В. Е. Юрасова, Тезисы докладов 8-го Всесоюзного Совещания по катодной электронике, Ленинград (1957), с. 15.
9. В. Е. Юрасова, ЖТФ **28**, 1966 (1958).
10. E. B. Henschke, J. Appl. Phys. **28**, 411 (1957); Phys. Rev. **106**, 737 (1956).
11. E. Langberg, Phys. Rev. **111**, 91 (1958).
12. R. H. Silsbee, J. Appl. Phys. **28**, 1246 (1957).
13. D. Onderdelinden, Appl. Phys. Lett. **8**, 189 (1966).
14. J. J. P. Elich and H. E. Roosendaal, Radiat. Eff. **10**, 175 (1971).
15. M. Robinson, in *Sputtering by Particle Bombardment I*, ed. by R. Behrisch, Springer-Verlag, Berlin (1981), p. 73.
16. В. Е. Юрасова, Н. В. Плещивцев, И. В. Орфанов, ЖЭТФ **37**, 966 (1959).
17. M. W. Thompson, Phil. Mag. **4**, 139 (1959).
18. М. В. Томпсон, *Дефекты и радиационные повреждения в металлах*, Наука, Москва (1971).
19. В. Е. Юрасова, И. Г. Сиротенко, ЖЭТФ **41**, 1350 (1961).
20. В. Е. Юрасова, Э. А. Мурина, Изв. АН СССР, сер. физ. **26**, 1445 (1962).
21. W. O. Hofer, in *Sputtering by Particle Bombardment III*, ed. by R. Behrisch and K. Witmaack, Springer-Verlag, Berlin (1991), p. 263.
22. B. Perović, Bull. Inst. Nucl. Sci. "Boris Kidrich" **11**, 37 (1961).
23. V. E. Yurasova, L. N. Levykina, and V. A. Brzhesinski, in *Proc. 3rd Europ. Regional Conf. on Electron Microscopy*, Prague (1964), p. 281.
24. M. Lucht, M. Lerche, H.-C. Wille, Yu. V. Shvyd'ko, H. D. Rüter, E. Gerdau, and P. Backer, J. Appl. Cryst. **36**, 1075 (2003).
25. A. M. Streletsov and N. F. Borrelli, Opt. Lett. **26**, 42 (2001).
26. J. Toofan and P. R. Watson, Surf. Sci. **401**, 162 (1978).
27. Huili Tang, Hongjun Li, and Jun Xu, in *Advanced Topics on Crystal Growth*, ed. by Sukarno Olavo Ferreira, (2013), ch. 10.
28. M. Ardenne, Technik **2**, 65 (1958).
29. И. В. Орфанов, В. А. Тепляков, ПТЭ № 2, 150 (1960).
30. M. T. Robinson and I. M. Torrens, Phys. Rev. B **9**, 5008 (1994).
31. A. A. Promokhov, V. A. Eltekov, V. E. Yurasova, and A. S. Mosunov, Nucl. Instr. Meth. B **115**, 544 (1996).
32. V. E. Yurasova, in *Proc. 7-th Yugoslav Symposium and Summer School on the Physics of Ionized Gases*, Rovinj, Yugoslavia (1974), p. 427.
33. A. S. Mosunov, L. B. Shelyakin, V. E. Yurasova, D. Čirić, B. Perović, and I. Tersić, Rad. Eff. **52**, 85 (1980).
34. W. Eckstein, *Sputtering by Particle Bombardment IV*, ed. by R. Behrisch and W. Eckstein, Springer-Verlag, Berlin (2007), p. 33.

35. А. А. Самарский, А. В. Гулин, *Численные методы*, Наука, Москва (1989).
36. О. Б. Фирсов, ЖЭТФ **36**, 696 (1957).
37. H. H. Andersen and P. Sigmund, Nucl. Instr. Meth. **38**, 298 (1965).
38. W. A. Harrison, *Electronic Structure and the Properties of Solids — the Physics of Chemical Bond*, W. H. Freemanand, San Francisco (1980).
39. K. Minnebaev, V. Khvostov, E. Zykova, K. Tolpin, J. Colligon, and V. Yurasova, in *Abstracts of 26-th Int. Conf. on Atomic Collisions in Solids*, Hungary (2014), p. 126.
40. Н. П. Катрич, А. Т. Будников, Вопросы атомной науки и техники № 4, 161 (2007).
41. V. V. Khvostov, I. K. Khrustachev, K. F. Minnebaev, E. Yu. Zykova, and V. E. Yurasova, Vacuum **100**, 84 (2014).