

05

Трибологические исследования слоев α - β -Ga₂O₃ в паре с сапфировым контртелом

© П.Н. Бутенко, Л.И. Гузилова, А.В. Чикиряка, А.И. Печников, В.И. Николаев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: pavel.butenko@ioffe.mail.ru

Поступило в Редакцию 16 марта 2021 г.

В окончательной редакции 12 апреля 2021 г.

Принято к публикации 13 апреля 2021 г.

Рассмотрена износостойкость эпитаксиальных слоев α - и β -полиморфов оксида галлия, выращенных на сапфировых подложках. Это одно из первых исследований трибологических свойств перспективного широкозонного полупроводникового кристалла. В результате проведенных триботестов с участием сапфирового контртела в процессе сухого трения на воздухе показано, что слои метастабильного α -Ga₂O₃ более стойки к истиранию, чем слои термостабильной β -фазы. При этом полученные величины коэффициентов износа позволяют отнести оба полиморфа к износостойким материалам, и особенно α -Ga₂O₃ со структурой корунда. Кроме того, α - и β -Ga₂O₃ демонстрируют крайне низкие значения коэффициентов трения, ниже, чем таковые у сапфира.

Ключевые слова: оксид галлия, эпитаксиальный слой, трибология, износостойкость, коэффициент трения.

DOI: 10.21883/JTF.2021.09.51214.62-21

Введение

Оксид галлия (Ga₂O₃) в настоящее время интенсивно изучается как перспективный полупроводниковый материал [1,2]. Вместе с тем сведения о его механических свойствах встречаются редко, что накладывает ограничения на применение его в качестве покрытий, функциональных материалов, поверхностей, работающих в средах, где есть механические взаимодействия и т.п. В то же время можно ожидать, что α -полиморф Ga₂O₃ со структурой корунда, являясь родственником сапфиру (α -Al₂O₃), обладает хорошими механическими свойствами [3–6]. Среди пяти выявленных полиморфов оксида галлия [7], термостабильный вплоть до температуры плавления (1800°C [8]) β -Ga₂O₃ — наиболее исследован как в целом, так и в плане его механических свойств [3–6,9].

Что касается трибологических испытаний кристаллов оксида галлия, тут информация отсутствует вовсе, что можно отметить и для большинства полупроводниковых кристаллов. Исключением являются немногочисленные публикации по износостойкости полупроводниковых кристаллов GaN, GaAs и Si [10,11]. Также есть сведения об износостойкости сапфира, который в опыте с сапфировым контртелом демонстрирует достаточно низкие коэффициенты сухого трения ($\mu = 0.08 - 0.2$) [12–14] и коэффициент износа ($k = 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$) [15]. В нашей недавней работе в процессе трибологического теста с участием стального контртела (стальной шарик 100Ст6) впервые были получены значения μ и k для аналогичных слоев Ga₂O₃ толщиной 5 μm [16]. Величины коэффициентов трения составили 0.12 и 0.13 для α - и β -слоев соответственно. Это неожиданно низкие

значения, которые требуют дальнейших уточнений и исследования влияния: условий синтеза слоев, их толщины, кристаллографических направлений и аппаратных параметров триботестов и пр.

В настоящей работе трибологические испытания проводились с использованием сапфирового контртела в паре с исследованными ранее образцами α - и β -полиморфов оксида галлия, с ростовой морфологией, выращенными на сапфировых подложках.

1. Материалы и методики

Эпитаксиальные слои оксида галлия толщиной 5–15 μm выращивались ООО „Совершенные кристаллы“ (Perfect Crystals LLC) на стандартных сапфировых подложках методом хлоридной газофазной эпитаксии (HVPE) [17,18]. Слои (0001) α -Ga₂O₃ были синтезированы при температуре $\sim 500^\circ\text{C}$, а (–201) β -Ga₂O₃ — при $\sim 1000^\circ\text{C}$ [19].

В большинстве экспериментов (описание см. ниже) для удовлетворения стандарту испытаний образцы наклеивались на толстые стальные пластинки со стороны сапфировой подложки.

Трибологические исследования проводились на микротрибометре AntonPaar TRB в режиме возвратно-поступательного теста (reciprocating test) при сухом скольжении. Использовалась модель „сфера на плоскости“ (sphere-on-flat). Тесты проводились при различных нагрузках на зонд, использовалось контртело в виде шарика из сапфира диаметром 4 mm, входящего в комплект триботестера. Основным результатом

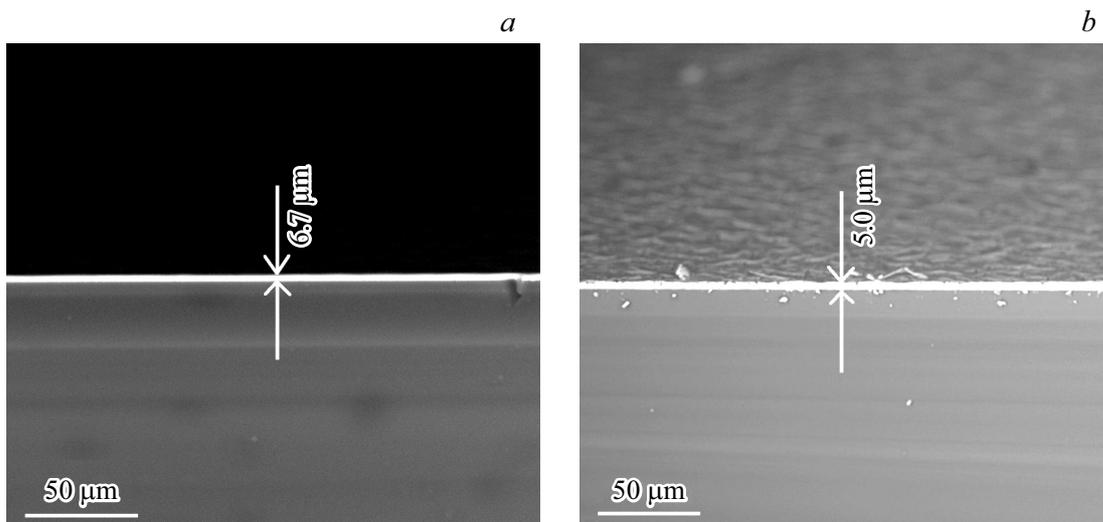


Рис. 1. SEM-изображения поверхностей скола слоев α -(A248N) (a) и β -Ga₂O₃ (B215N) (b) на сапфировой подложке.

исследований являлось получение значений коэффициентов сухого трения (μ). Для дополнительной калибровки прибора (непосредственно в условиях, в которых проводились испытания) мы измерили коэффициент трения пары, состоящей из сапфировой подложки и сапфирового контртела, и получили совпадение с результатом, фигурирующим в других работах ($\mu = 0.2$ [12,13]).

Для изучения геометрии следов износа, полученных в результате триботеста, использовался профилометр MarSurf PS-10. С помощью него были определены величины шероховатостей поверхностей (R_z , R_a) и геометрические параметры профилей, что позволило применить модель Арчарда (см. ниже) и рассчитать коэффициенты износа (k).

Сканирующий электронный микроскоп (SEM, Phenom ProX) применялся для определения толщин слоев оксида галлия (по сколу образца), исследования следов износа, образовавшихся в результате проведенных триботестов, и для контроля целостности контртела после окончания триботестов.

Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS на установке Phenom ProX) определялся химический состав на разных участках образцов в области следов износа. Необходимо отметить, что в настоящей работе анализ химического состава носит ориентировочный характер. Это следует из сложности его определения непосредственно на участках, где наблюдается практически полное истирание слоя. В этом случае он может иметь различную толщину и участки, где он отсутствует. Таким образом, влияние элементов подложки может быть существенным.

Все эксперименты проводились при нормальных атмосферных условиях (NTP) и относительной влажности воздуха 40%RH.

2. Результаты и обсуждение

Исследование контртела показало, что заметный его износ отсутствовал, что было подтверждено наблюдением геометрии последнего в разных проекциях методом электронной сканирующей микроскопии после завершения всех проводимых для данной работы триботестов.

2.1. Определение толщин слоев оксида галлия

Для определения толщин слоев α - и β -Ga₂O₃ в образцах при помощи SEM прибегали к их раскальванию. Плоскость, появившаяся в результате скола, размещалась в рабочем пространстве SEM горизонтально. Слои оксида галлия и сапфировая подложка дают различный контраст, что позволяет определять их толщины. Для удобства образец α -полиморфа, толщина слоя которого составила 6.7 μm , был промаркирован, как A248N, образец β -полиморфа с толщиной слоя 5 μm — B215N. Образцы с большими толщинами слоя имели маркировки A423K (11 μm) и B187K (15 μm). Первая буква A и B — α - и β -полиморф, последовательность цифр — номер ростового процесса, последняя буква N и K — „толстый“ и „тонкий“.

На рис. 1 в качестве примера приведены SEM-изображения, по которым были определены толщины слоев A248N и B215N (рис. 1, a и b соответственно).

2.2. Следы износа и полное разрушение слоя Ga₂O₃

Параметры трибологических испытаний образцов во всех случаях были одинаковы, а именно: амплитуда возвратно-поступательного движения (половина длины цикла) составляла 6 mm, общая длина пробега контртела — 50 m, количество циклов — 4167 (или 8333 по-

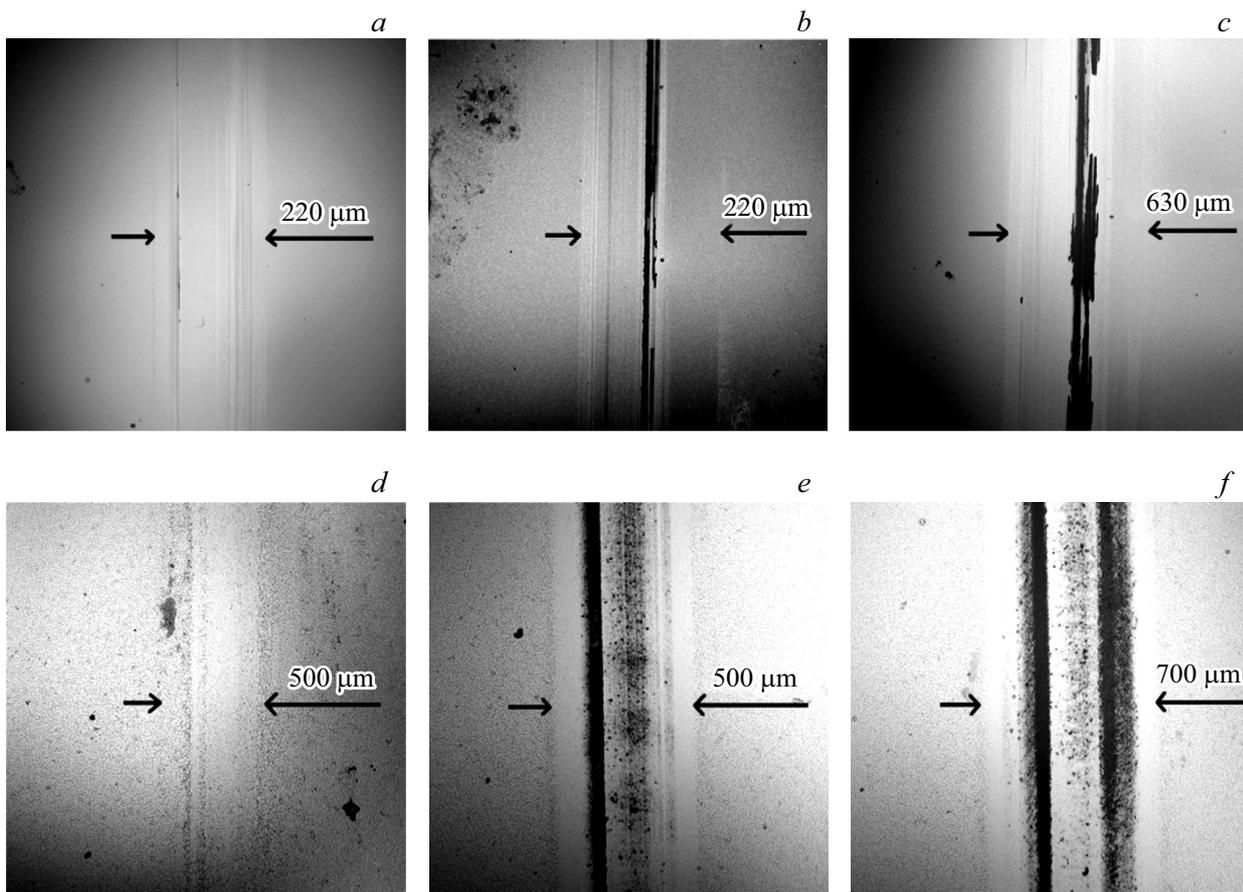


Рис. 2. SEM-изображения следов износа на поверхностях образцов при различных значениях нагрузки (*a, d* — $F_n = 1$ N; *b, e* — $F_n = 2$ N; *c, f* — $F_n = 5$ N) для слоев α -(A248N) и β -Ga₂O₃ (B215N) (*a, b, c* и *d, e, f* соответственно).

луциклов, т.е. проходов в одну сторону), максимальная линейная скорость перемещения контртела по поверхности образца — 5.65 cm/s. Нормальная нагрузка (F_n) на контртело варьировалась и составляла 1, 2, 5 N. Для повышения достоверности результатов для каждого образца при каждой нагрузке было проведено по три испытания.

На рис. 2 приведены SEM-изображения (вид сверху) следов износа на поверхностях слоев обоих полиморфов оксида галлия (образцы с тонкими слоями Ga₂O₃: A248N и B215N) после окончания триботестов. При нагрузках 2 и 5 N (рис. 2, *b, e* и рис. 1, *c, f* соответственно) поверхности некоторых образцов имели фрагментарно полный износ¹ слоя (визуальная оценка следов износа по SEM-изображениям). Износ слоя β -полиморфа выше износа слоя α -Ga₂O₃ (рис. 2, *e, f*), кроме того, он увеличивался с повышением нагрузки на контртело: при $F_n = 2$ N его величина была больше на 5%, в то время как при $F_n = 5$ N — на 35%. Результаты триботестов поверхностей, имеющих полный износ, могут иметь

¹ Полный износ (total wear), являясь стандартным термином, подразумевает, что изучаемый слой разрушен полностью (в данном случае вплоть до подложки), но фрагментарно, т.е. отсутствуют участки слоя не по всей его площади.

высокие погрешности, что делает их неприменимыми в том числе и для последующего использования. Необходимо учитывать этот фактор, ограничивая или исключая использование нагрузок на контртело, вызывающих разрушение слоя. Полученные SEM-изображения поверхностей образцов с толстыми слоями (A423K и B187K) после триботестов имеют похожие по ширине и форме следы износа, однако полного износа в этих образцах мы не наблюдали.

Теоретически вероятность разрушения слоев оксида галлия при триботесте можно оценить по величинам нормальных и тангенсальных напряжений, действующих на слой при испытании. Для этого была применена методика расчета [20,21], в основе которой используются формулы Герца [22]. Она учитывает геометрию и физико-химические характеристики обоих контртел. Расчет производили для максимальной (используемой нами) нормальной нагрузки 5 N. Данные модулей Юнга и коэффициентов Пуассона для слоев α - и β -Ga₂O₃ и объемного монокристаллического сапфира взяты из [5,6,23,24]. Таким образом, в случае использования сферы (сапфировый шарик) на плоскости (слой оксида галлия) максимальные герцевские контактные и сдвиговые дав-

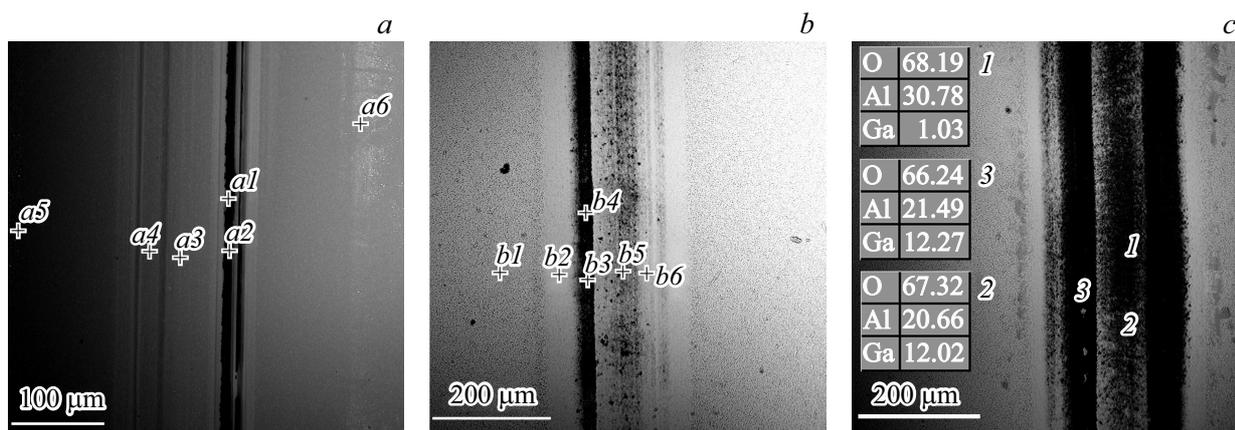


Рис. 3. SEM-изображения поверхность образцов. Указаны участки проведения анализа химического состава слоев вблизи следов износа: α -Ga₂O₃ (A248N) точки *a1*–*a5* (*a*), β -Ga₂O₃ (B215N) точки *b1*–*b6* при нагрузке 2 N (*b*); β -Ga₂O₃ (B215N) точки *1*–*3* при нагрузке 5 N (*c*).

Таблица 1. Распределение химических элементов по данным EDS на поверхности слоев α - и β -Ga₂O₃ (образцы A248N и B215N) в разных участках относительно следов износа в результате триботеста (при $F_n = 2$ N)

Образцы	Элемент	Атомная концентрация, %						
		Позиция курсора	<i>a1</i>	<i>a2</i>	<i>a3</i>	<i>a4</i>	<i>a5</i>	<i>a6</i>
α -Ga ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ (A248N)	О		67.90	67.93	66.50	67.44	67.91	68.08
	Al		31.36	31.17	23.35	23.47	22.09	21.73
	Ga		0.74	0.90	10.15	9.09	10.00	10.19
β -Ga ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ (B215N)	Позиция курсора		<i>b1</i>	<i>b2</i>	<i>b3</i>	<i>b4</i>	<i>b5</i>	<i>b6</i>
	О		70.95	71.03	68.05	67.17	66.54	71.99
	Al		0	0	29.89	31.09	28.43	21.39
	Ga		29.05	28.97	2.060	1.74	5.03	6.62

ления составили величины ($P_{H \max} = 1.17$ и 1.87 GPa) и ($T_{H \max} = 361$ и 576 MPa) (для слоев α - и β -Ga₂O₃ соответственно). Микротвердость слоев оксида галлия при комнатной температуре $8 - 20$ GPa (в зависимости от кристаллографической ориентации) [3,4], что составляет $1/7 - 1/17$ от максимальных герцевских контактных давлений. Поэтому в данном случае за истирание покрытий при триботестах ответственны сдвиговые деформации на границе раздела контртел.

2.3. Химический состав следов износа

Оценка химического состава слоев оксида галлия обоих полиморфов была проведена на SEM с приставкой EDS. В данном случае значения концентраций носили скорее качественный характер: показывали присутствие материала слоя и материала подложки в рассматриваемой области. Изучались те образцы с тонкими слоями (A248N и B215N), которые при $F_n = 2$ и 5 N визуально имели полный износ в областях, где проводилось три-

бологическое испытание (рис. 2). Оба слоя после триботеста при $F_n = 1$ N имели стехиометрический состав трехвалентного оксида галлия, в отличие от триботестов при нагрузках 2 и 5 N. На рис. 3 отмечены участки поверхности слоя в районе следа износа и непосредственно в нем, на которых производились измерения состава (при $F_n = 2$ и 5 N). Численные значения концентраций химических элементов представлены в табл. 1 (при $F_n = 2$ N). Согласно концентрациям химических элементов (табл. 1), темные участки на SEM-изображениях соответствуют местам полного истирания, в которых на сапфировой подложке полностью отсутствует слой Ga₂O₃. Смешанные по контрасту участки в слоях α -фазы имеют содержание Ga в концентрации, соответствующей стехиометрии соединения, в то время как подобные участки β -фазы содержат высокий процент Al.

Кроме того, в результате проведения триботеста слоя β -Ga₂O₃ при нагрузке 5 N область износа имеет характерный вид (рис. 3, *c*, подобно рис. 2, *f*), а именно в центре следа износа (темная полоска) видна светлая

полоска оставшегося слоя Ga_2O_3 . Химический состав этой полоски был определен в трех точках, выбранных на исследуемой полоске (рис. 3, *c*), при этом концентрации Ga [at.%] составляют 1.03, 12.02, 12.27 (точки 1, 2, 3 соответственно). Исходя из сферической формы контртела, при условии, что с обеих сторон следа слой Ga_2O_3 отсутствует, в центре следа износа этого слоя тем более не должно быть. По этой причине повышенная концентрация Ga может указывать на присутствие продуктов истирания в виде оксида галлия.

2.4. Профили следов износа

При помощи профилометра фиксировались сечения, перпендикулярные следам износа на поверхности слоев оксида галлия, полученным при трибологических испытаниях. В каждом случае на одном образце было произведено три триботеста (рис. 4) при разных нагрузках на зонд. Следы износа параллельны друг другу, так как для каждой следующей серии образец перемещался перпендикулярно движению контртела.

Профили сечений слоев α -фазы оксида галлия (образцы A248N и A423K) приведены на рис. 5, *a, b*. При нагрузках 1 N и 2 N A248N профили следа износа схожи по форме и по размеру (рис. 5, *a*). Однако при нагрузке 5 N мы наблюдаем профиль следа износа, нехарактерный для контртела (шар), которое было использовано в триботесте. Последнее может сигнализировать о неконтролируемом разрушении верхней части слоя, в то время как нижняя часть профиля имеет характерную для данного контртела сферическую форму. Вместе с тем глубина профиля составляет порядка $7\ \mu\text{m}$, таким образом, слой оксида галлия на этом участке (толщина слоя $6.7\ \mu\text{m}$) в этом образце (A248N) был удален. Обращает на себя внимание остроугольная трещина, распространяющаяся

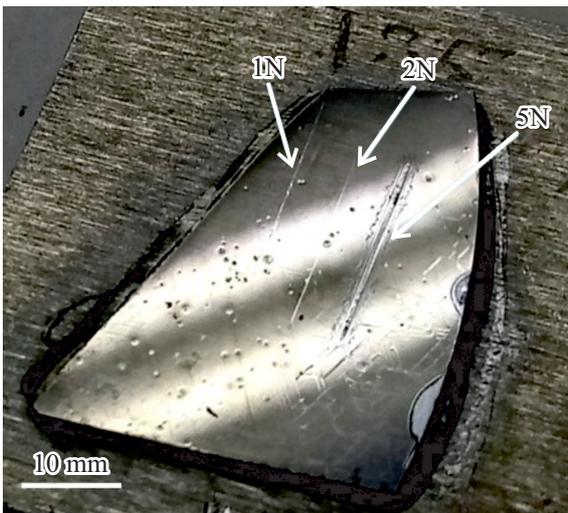


Рис. 4. Образец $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (B187K), наклеенный на стальную пластину. Стрелками показаны следы износа после проведения триботестов при разных нагрузках на зонд ($F_n = 1, 2, 5\ \text{N}$).

на $2\ \mu\text{m}$ вглубь образца перпендикулярно его поверхности. Исходя из геометрии слоев данного образца, эта трещина находится в слое сапфира. На рис. 5, *b* (толстый $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$, $F_n = 1, 2\ \text{N}$) наблюдается подобная ситуация, однако глубины следов в этом случае меньше в 6 раз. При нагрузке 5 N характер разрушения слоя также подобен тонкому образцу, однако, глубина профиля здесь $6\ \mu\text{m}$, что означает, что слой толщиной $11\ \mu\text{m}$ на участке трения полностью не удален.

На рис. 5, *c, d* показаны профили сечений, перпендикулярных следу износа, полученному в результате проведения триботеста слоев β -полиморфа. Глубины следов при трении толстого слоя (образец B187K) (рис. 5, *c*) при нагрузках $F_n = 1$ и $2\ \text{N}$ составляли порядка $10\ \mu\text{m}$, а при $F_n = 5\ \text{N}$ — $13\ \mu\text{m}$, т.е. при всех тестах слой оксида галлия присутствовал. На рис. 5, *d* изображен профиль сечения, соответствующий трибологическому испытанию образца B215N при нагрузке 5 N. Глубина в центре следа износа порядка $8\ \mu\text{m}$, что превышает толщину данного слоя. Это указывает на вероятное частичное истирание материала сапфировой подложки. Стрелкой указан выгиб профиля вверх, что может свидетельствовать или о специфическом характере износа, или о присутствии материала, прежде удаленного в процессе триботеста, возможно, в виде спрессованного порошка. Последнее предположение согласуется с данными, представленными на рис. 2, *f* и 3, *c*. Качественные профили на образце B215N при меньших нагрузках получить не удалось, так как глубины следов износа были соизмеримы с шероховатостью поверхности слоя. Следует отметить, что профили следов износа и толстых, и тонких слоев β -полиморфа не имеют сферической формы (формы контртела), что свидетельствует о неравномерном истирании и частичном разрушении (скалывании) слоя.

Была измерена шероховатость поверхности слоев оксида галлия для всех четырех образцов. Данные представлены в табл. 2, в которой R_a — среднее арифметическое отклонение профиля и R_z — высота неровностей профиля по десяти точкам. Значения шероховатостей поверхности слоев β -фазы существенно выше значений α -полиморфа, что было отражено ранее на профилях сечений поверхности обоих слоев (рис. 5).

2.5. Определение величин коэффициентов износа k

Величины коэффициентов износа рассчитывались для тонких и толстых слоев обоих полиморфов (образцы A248N, B215N и A423K, B187K соответственно), исходя из геометрии следов износа с использованием сечений, полученных на профилометре. Для этого определялся объем удаленного материала V . Принимая во внимание то, что геометрия сечений в каждом отдельном триботесте близка, $V = S_{xs} \cdot l/2$, где S_{xs} — площадь сечения, l — длина одного цикла триботеста. Площадь сечений рассчитывалась с помощью специально

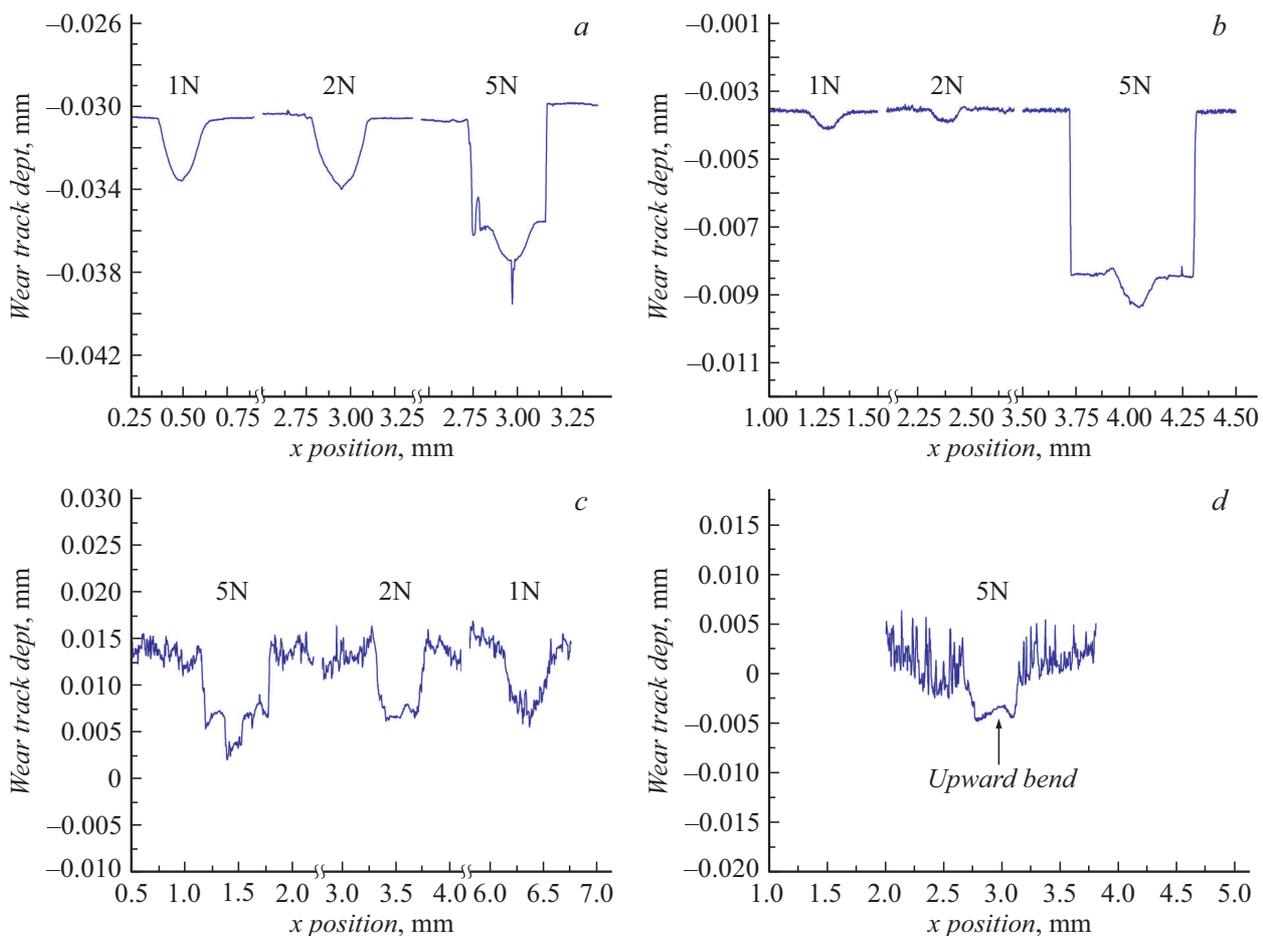


Рис. 5. Профили сечений, перпендикулярных следу износа, при разных нагрузках на зонд ($F_n = 1, 2, 5$ N): *a* — слой α -Ga₂O₃ (A248N), *b* — слой β -Ga₂O₃ (A423K), *c* — слой β -Ga₂O₃ (B187K); *d* — слой β -Ga₂O₃ (B215N) при $F_n = 5$ N, показан выгиб профиля вверх.

Таблица 2. Значения шероховатостей (R_a и R_z) поверхностей исследуемых образцов оксида галлия

Образцы	A248N	A423K	B215N	B187K
R_a	0.011±0.001	0.024±0.008	0.975±0.044	0.641±0.030
R_z	0.095±0.009	0.180±0.025	6.310±0.086	4.908±0.083

разработанного программного обеспечения. Поскольку твердости контртел (оба полиморфа оксида галлия и сапфир) имеют близкие значения, правомерно использование модели Арчарда [25]. По формуле (1) были рассчитаны значения k для α - и β -Ga₂O₃

$$k = \frac{v}{f_n \cdot d}, \quad (1)$$

где d — общая длина пробега зонда в тесте. На рис. 6 показаны значения коэффициентов износа, вычисленные для тех нагрузок на контртело, при которых ни в одном из образцов не происходило полного разрушения слоя оксида галлия ($F_n = 1$ и 2 N, соответствующие значениям максимальных контактных давлений $P_{H \max} = 887$ и

1118 МПа [20]). Согласно расчету,

$$k(\text{B187K}) = (2.3 \pm 1.3)10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m}),$$

$$k(\text{B215N}) = (3.7 \pm 1.0)10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m}),$$

$$k(\text{A248N}) = (3.4 \pm 2.8)10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m}),$$

$$k(\text{A423K}) = (4.6 \pm 1.4)10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m}).$$

В итоге значения k , полученные для слоев α -полиморфа, ниже, чем для β -Ga₂O₃, что подтверждает более высокое структурное совершенство, которое имеет плотноупакованная тригональная решетка α -фазы [7]. Кроме того, коэффициент износа у толстых слоев обеих фаз ниже, чем у тонких. Это может быть связано с тем, что

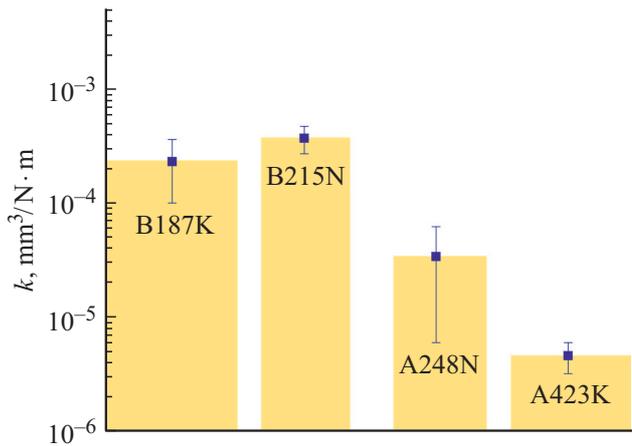


Рис. 6. Значения коэффициентов износа (k) поверхностей слоев α - и β -Ga₂O₃ (образцы A248N, A423K и B215N, B187K соответственно), рассчитанных после проведения триботестов с сапфировым контртелом.

при гетероэпитаксии по мере удаления от интерфейса качество образующихся слоев улучшается.

Сравнение коэффициента износа α -Ga₂O₃ со значением, полученным для слоев GaN ($0.95 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$) в результате проведения триботеста с использованием рубинового контртела, 50% RH [10] показывает, что они соизмеримы. Кроме того, полученное в этой работе значение k для α -фазы при трении сапфировом контртелом, отлично совпадает со значением ($5 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$), полученным нами ранее при аналогичном тесте, в котором использовалось контртело в виде 4-х миллиметрового стального шара (сталь 100Cr6) [16]. Исходя из этих фактов, можно утверждать, что слои α -оксида галлия являются в высокой степени износоустойчивыми.

2.6. Определение коэффициента трения μ

По результатам трибологического эксперимента были построены зависимости коэффициента трения от номера цикла (рис. 7), полученные при разных значениях нормальной нагрузки ($F_n = 1, 2, 5 \text{ N}$) для толстых образцов A423K и B187K. Из графиков видно, что с увеличением количества циклов для слоев α -Ga₂O₃ наблюдается слабое увеличение, а для слоев β -Ga₂O₃ — наоборот, слабое уменьшение коэффициента трения. Были определены средние значения коэффициентов трения для всех образцов: $\mu(\text{B187K}) = 0.11 \pm 0.02$, $\mu(\text{B215N}) = 0.07 \pm 0.02$, $\mu(\text{A248N}) = 0.06 \pm 0.01$, $\mu(\text{A423K}) = 0.07 \pm 0.02$ (рис. 8). Как видно, коэффициент трения α -полиморфа ниже, чем у β -Ga₂O₃, причем тонкие слои имеют несколько меньший μ . Сравнение с результатами, полученными нами ранее при аналогичном трибологическом испытании со стальным контртелом [16] ($\mu = 0.12$ и 0.13 для α - и β -фазы соответственно), дает хорошее их совпадение в случае толстых слоев β -фазы. Тонкие слои β -Ga₂O₃, так же как

и слои обоих образцов α -полиморфа, демонстрируют крайне низкие μ , значительно ниже тех, которые имеют GaN (0.21) и даже Al₂O₃ (0.15) [10,26]. Еще более низкие показатели коэффициента трения иногда все же встречаются в публикациях о полупроводниковых материалах. Так, $\mu = 0.02$ наблюдались на поверхности алмаза в результате проведения триботестов [27,28]. Авторы этот

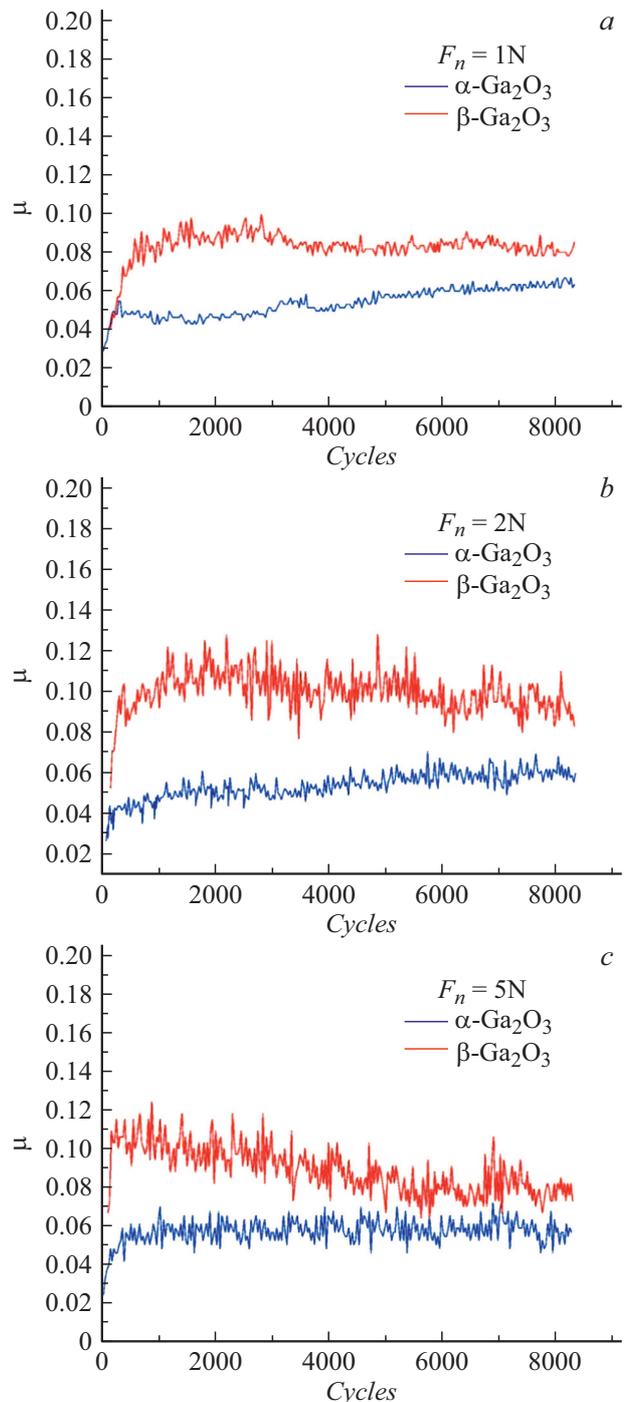


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения (μ) от номера цикла в триботесте при различных значениях нагрузок (a — $F_n = 1 \text{ N}$, b — $F_n = 2 \text{ N}$, c — $F_n = 5 \text{ N}$) для слоев α - и β -Ga₂O₃ (образцы A423K и B187K).

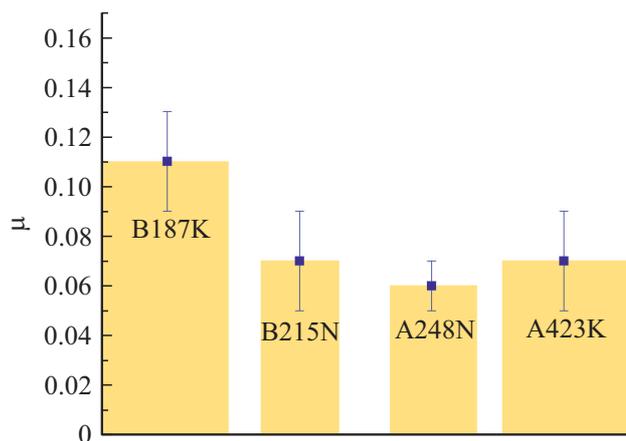


Рис. 8. Значения коэффициентов трения (μ) для поверхностей слоев α - и β -Ga₂O₃ (образцы A248N, A423K и B215N, B187K соответственно), рассчитанных после проведения триботестов с сапфировым контртелом.

феномен объясняли присутствием наночастиц алмаза, играющих роль сухой смазки, существенно понижающий значения μ . В нашем случае мы наблюдаем предположительно мелкодисперсные частицы оксида галлия в следах износа в тонких образцах β -фазы (B215N). Именно в этом случае коэффициент трения рекордно низкий.

Выводы

В результате трибологических испытаний слоев оксида галлия в паре с сапфировым контртелом, было показано:

— коэффициент износа слоев метастабильного α -полиморфа заметно ниже, чем у слоев термостабильного β -полиморфа, и составляет $4.6 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$, что ставит его в ряд высокоизносостойких материалов;

— коэффициенты трения слоев α -фазы также ниже, чем для слоев β -Ga₂O₃, (0.06 и 0.07 соответственно), при этом для обоих полиморфов они крайне низки в сравнении с большинством материалов. Авторы предполагают, что этому может способствовать образование порошкообразного оксида галлия, который был обнаружен в следах износа. Образующийся при истирании и скапливавшийся в центральной части следа износа, он может служить сухой смазкой. Тонкие слои обеих фаз показывают меньшие коэффициенты трения, нежели толстые.

Значения коэффициентов трения и износа, полученные нами ранее на α - и β -полиморфах Ga₂O₃ в триботесте со стальным контртелом, согласуются с результатами данного исследования, что подтверждает высокие трибологические свойства данных слоев.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Якупову О.Э. за разработку программного обеспечения, с помощью которого были определены площади поперечного сечения следов износа.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E.O. Jonson. RCA Rev., **26**, 163 (1965).
- [2] M.N. Yoder. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-43**, 1633 (1996).
- [3] A.K. Battu, C.C. Ramana. Adv. Eng. Mater., **20**, 1701033 (2018).
- [4] А.С. Гращенко, С.А. Кукушкин, В.И. Николаев, А.В. Осипов, Е.В. Осипова, И.П. Сошников. ФТТ, **60** (5), 851 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2021.09.51214.62-21 [A.S. Grashchenko, S.A. Kukushkin, V.I. Nikolaev, A.V. Osipov, E.V. Osipova, I.P. Soshnikov. Physics Solid State, **60** (5), 852 (2018). DOI: 10.1134/S1063783418050104]
- [5] В.И. Николаев, А.В. Чикиряка, Л.И. Гузилова, А.И. Печников. Письма в ЖТФ, **45** (21), 51 (2019). DOI:10.21883/PJTF.2019.21.48476.17991 [V.I. Nikolaeva, A.V. Chikiryaka, L.I. Guzilova, A.I. Pechnikov. Tech. Phys. Lett., **45** (11), 1114 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019110117]
- [6] Л.И. Гузилова, А.С. Гращенко, А.И. Печников, В.Н. Маслов, Д.В. Завьялов, В.Л. Абдрахманов, А.Е. Романов, В.И. Николаев. Физика и механика материалов, **29** (2), 166 (2016). [L.I. Guzilova, A.S. Grashchenko, A.I. Pechnikov, V.N. Maslov, D.V. Zav'yalov, V.L. Abdrachmanov, A.E. Romanov, V.I. Nikolaev. Mater. Phys. Mechan., **29** (2), 166 (2016).]
- [7] S.I. Stepanov, V.I. Nikolaev, V.E. Bougrov, A.E. Romanov. Rev. Adv. Mater. Sci., **44**, 63 (2016).
- [8] R. Roy, V.G. Hill, E.F. Osborn. J. Amer. Chem. Soc., **74**, 719 (1952).
- [9] E.G. Villora, S. Arjoca, K. Shimamura, D. Inomata, K. Aoki. Proc. Of SPIE, **8987**, 89871U (2017).
- [10] G. Zeng, C. Tan, N. Tansu, B.A. Krick. App. Phys. Lett., **109**, 051602 (2016).
- [11] H. Mishina. *The Friction Behavior of Semiconductors Si and GaAs in Contact With Pure Metals. NASA Technical Memorandum 83779* (Lewis Research Center, Cleveland, USA, 1985)
- [12] D.E. Kim, N.P. Suh. Wear, **162**, 873 (1993).
- [13] C.G. Goetzl, J.B. Rittenhouse, J.B. Singletary. *Space materials handbook*. 2nd ed. (Addison Wesley Publishing Co., NY., USA 1965)
- [14] F. Pape, H.-H. Gatzel, G. Poll. Tribology Online, **11** (5), 547 (2016).
- [15] M. Fallqvist, M. Olsson, S. Rupp. Surf. Coat. Technol., **202**, 837 (2007).
- [16] P.N. Butenko, L.I. Guzilova, A.V. Chikiryaka, A.I. Pechnikov, A.S. Grashchenko, A.O. Pozdnyakov, V.I. Nikolaev. Mater. Phys. Mechan., **47** (1), 52 (2021).

- [17] В.И. Николаев, А.И. Печников, С.И. Степанов, Ш.Ш. Шарофидинов, А.А. Головатенко, И.П. Никитина, А.Н. Смирнов, В.Е. Бугров, А.Е. Романов, П.Н. Брунков, Д.А. Кириленко. *ФТП*, **50** (7), 997 (2016). [V.I. Nikolaev, A.I. Pechnikov, S.I. Stepanov, Sh.Sh. Sharofidinov, A.A. Golovatenko, I.P. Nikitina, A.N. Smirnov, V.E. Bugrov, A.E. Romanov, P.N. Brunkov, D.A. Kirilenko. *Semiconductors*, **50** (7), 980 (2016).]
- [18] Y. Oshima, E.G. Ilora, K. Shimamura. *Handbook of Solid State Chemistry* (Wiley-VCH GmbH, Weinheim, Germany, 2017)
- [19] А.И. Печников, С.И. Степанов, А.В. Чикиряка, М.П. Щеглов, М.А. Однoblудов, В.И. Николаев. *ФТП*, **53** (6), 789 (2019). DOI: 10.21883/ЖТФ.2021.09.51214.62-21 [A.I. Pechnikov, S.I. Stepanov, A.V. Chikiryaka, M.P. Scheglov, M.A. Odnobludov, V.I. Nikolaev. *Semiconductors*, **53** (6), 789 (2019). DOI: 10.1134/S1063782619060150]
- [20] R. Budynas, K. Nisbett. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 8th ed. (McGraw-Hill, NY, USA, 2008)
- [21] P.M.J. Rahnejat. PhD. *Thesis* (London, University of London, 1988)
- [22] K.L. Johnson. *Contact Mechanics* (Cambridge University Press, Cambridge, England, 1985)
- [23] P. Auerkari. *Mechanical and Physical Properties of Engineering Alumina Ceramics* (VTT, Espoo, Finland, 1996)
- [24] T. Vodenitcharova, L.C. Zhang, I. Zarudi, Y. Yin, H. Domyo, T. Ho, M. Sato. *J. Mater. Proc. Technol.*, **194** (1–3), 52 (2007).
- [25] J.F. Archard. *J. Appl. Phys.*, **24** (8), 981 (1953).
- [26] E.J. Duwell. *J. Appl. Phys.*, **33** (9), 2691 (1962).
- [27] J. Gobet, P.N. Volpe, M.A. Dubois. *Appl. Phys. Lett.*, **108** (12), 124103 (2016).
- [28] E.S. Gadelmawlaa, M.M. Kourab, T.M.A. Maksoudc, I.M. Elewaa, H.H. Soliman. *J. Mater. Proc. Tech.*, **123** (62), 133 (2002).