

УДК 621.923

Филатов<sup>1</sup> Ю.Д., д.т.н.; Сидорко<sup>1</sup> В.И., д.т.н.; Юрчишин<sup>2</sup> О.Я., к.т.н.

1 - Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина;

2 - НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

## НАНОПОЛИРОВАНИЕ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ ОПТИКИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Filatov<sup>1</sup> Yu., Sidorko<sup>1</sup> V., Yurchyshyn<sup>2</sup> O.

1 - V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine;

2 - National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (mmi@kpi.ua)

### NANO-POLISHING SUBSTRATES FOR OPTICS AND MICROELECTRONICS

*В результате исследования полирования монокристаллических материалов показано, что полирование плоских поверхностей оптоэлектронных элементов из монокристаллов карбида кремния целесообразно осуществлять с использованием полировочной суспензии порошков на основе МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$  и коллоидных систем наночастиц, а монокристаллов сапфира - с помощью суспензии из алмазных микропорошков, порошков кубического нитрида бора и МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$ . Нанополірованню поверхностей елементів монокристаллів сапфіра слід здійснювати при використанні коллоїдної системи наночастиць або традиційних складів на основі коллоїдного діоксиду кремнія. Показано також, що продуктивність поліровки монокристаллів карбіда кремнія і сапфіра обернено пропорційна енергії переносу, максимальне значення якої відповідає мінімальній шерохватості.*

*Ключевые слова:* полирование; монокристаллы; наночастицы; коллоидная система; шероховатость.

**Постановка проблемы.** Монокристаллические материалы, в том числе сапфир, карбид кремния, нитриды алюминия и галлия, которые широко применяются в оптико-электронной технике, в современном производстве изготавливают при помощи методов алмазно-абразивной обработки. Операцию полирования осуществляют в несколько переходов в зависимости от требований, предъявляемых к обрабатываемой поверхности. Полированные поверхности оптических элементов должны удовлетворять требованиям по точности формы – 3–5 интерференционных колец и по качеству обработанных поверхностей от 60–40 до 20–10 (U.S Military Surface Quality Specification, MIL-PRF-13830B). Поверхности подложек, подготовленные под нанесение эпитаксиального слоя (epi-ready) должны удовлетворять требованиям, регламентирующим точность ориентации плоскости кристалла ( $\pm 0,2\text{--}0,5^\circ$ ), плотность дислокаций ( $(1\text{--}4)\cdot 10^3\text{ см}^{-2}$ ), плотность микропапов (менее  $30\text{ см}^{-2}$ ), структурное совершенство (FWHM – полуширина линии качания – 30–50 угл. сек), а также «оптическим» требованиям по неплоскостности (менее 10 мкм на диаметре 3 дюйма) и шероховатости ( $Ra=0,3\text{--}1,0\text{ нм}$ ). Шероховатость обработанной поверхности является наиболее важным показателем процесса полирования прецизионных поверхностей элементов оптоэлектроники и характеризует качество обработанных поверхностей. Улучшение качества обработки оптико-электронных элементов из монокристаллических материалов может быть достигнуто только при использовании новых полировальных суспензий и коллоидных систем из наночастиц, оптимизация характеристик которых является актуальной.

Для определения производительности алмазно-абразивной обработки прецизионных поверхностей элементов оптико-электронной техники традиционно используют модель съема обрабатываемого материала при полировании, основанную на кластерной модели износа взаимодействующих при трении поверхностей твердых тел [1–4], и физико-статистическую модель образования и удаления с обрабатываемой поверхности частиц шлама (ЧШ) [5]. Размеры этих частиц, их концентрацию в зоне контакта и характер взаимодействия с частицами износа и контактирующими поверхностями определяют как производительность механической обработки неметаллических материалов на всех технологических операциях, так и состояние этих поверхностей.

Целью исследования является изучение влияния свойств обрабатываемого материала и полировальной суспензии на производительность полирования и шероховатость обработанных поверхностей.

**Методика определения показателей процесса полирования подложек.** На основе кластерной модели износа [4, 5] процесс съема обрабатываемого материала при полировании можно рассматривать как накопление энергии в критическом объеме – кластере, т. е. переходы кластера в дискретном эквидистантном энергетическом спектре. С учетом многочастотного режима взаимодействия поверхностей обрабатываемой детали и инструмента, когда собственные колебания фрагментов происходят на частотах  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02k}$  ( $l, k -$

порядковые номера частот) соответственно, можно определить число возбужденных фрагментов  $\xi_{lk} = \frac{\omega_{01l}^4}{(\omega_{01l}^2 - \omega_{02k}^2)^2}$ , характерные частоты  $\omega_{lk} = \frac{3\omega_{01l}\omega_{02k}}{2(\omega_{01l} + \omega_{02k})}$ , число молекулярных фрагментов в кластере

$\xi = \left[ \sum_{lk} \xi_{lk} \right]$  и энергию кластера  $E_{cl} = \sum_{lk} [\omega_{01l} \hbar \xi_{lk}]$  (где  $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка).

Обрабатываемый материал отделяется от поверхности в виде частицы шлама только тогда, когда энергия кластера  $E_{cl}$  превысит энергию связи обрабатываемого материала  $E_b$ . Распределение частиц шлама по площадям поверхности описывается распределением Пуассона  $P(i, \nu) = \frac{e^{-\nu} \nu^i}{i!}$  с параметром  $\nu = E_b/E_{cl}$  [5].

Диэлектрические проницаемости  $\varepsilon_l$  обрабатываемого и  $\varepsilon_k$  инструментального материалов определяются на характерных частотах  $\omega_{lk}$ , а константа Лифшица  $A_L = \hbar \omega_{123}$  рассчитывается в соответствии с формулой

$$\omega_{123} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{[\varepsilon_1(\omega_{lk}) - \varepsilon_3][\varepsilon_2(\omega_{lk}) - \varepsilon_3]}{[\varepsilon_1(\omega_{lk}) + \varepsilon_3][\varepsilon_2(\omega_{lk}) + \varepsilon_3]} d\Omega, (\Omega \in [\omega_1; \omega_2], \omega_1 \text{ и } \omega_2 - \text{минимальная и максимальная частоты}).$$

Площадь  $i$ -ой частицы шлама определяется как  $S_i = S_0 (i + 1)$  (где  $i = \overline{1, N}$ ,  $N$  – число выборок,  $S_0$  – площадь поверхности кластера, которая зависит от структуры обрабатываемого материала и числа молекулярных фрагментов  $\xi$ ). Площадь поверхности кластера существенно зависит от кристаллографической ориентации плоскости монокристалла (постоянные решетки  $a$  и  $c$ ), которая подвергается полированию. Рассматривая кристаллы с гексагональной структурой, можно определить каким образом из отдельных молекулярных фрагментов складываются кластеры, которые, отрываясь от обрабатываемой поверхности, превращаются в частицы шлама. При полировании плоскости  $C$  [0001] число молекулярных фрагментов определяется соответствующими расстояниями  $a$ ,  $a$  и  $c/6$ , число молекулярных фрагментов  $\xi = k_1 k_2 k_3$ , а минимальная площадь поверхности частиц  $S_0 = 3\sqrt{3} a^2 k_1 k_2 + (1/2) a c k_1 k_3 + (2/3) a c k_2 k_3$ . При полировании плоскости  $A$  [1120] число молекулярных фрагментов определяется межплоскостными расстояниями  $a\sqrt{3}$ ,  $a/2$  и  $c/6$ , минимальная площадь поверхности частиц –  $S_0 = \sqrt{3} a^2 k_1 k_2 + (1/\sqrt{3}) a c k_1 k_3 + (1/6) a c k_2 k_3$ .

Плоские поверхности элементов из карбида кремния (плоскость  $C$ ) и сапфира (плоскость  $A$ ) полировали на шлифовально-полировальном станке при частоте вращения полировальника 90 об/мин, давлении прижима детали к притиру 0,003–0,005 МПа, смещении штриха 30 мм, длине штриха 50 мм и средней температуре в зоне контакта 300 К. Монокристаллический карбид кремния (плотность 3,21 г/см<sup>3</sup>,  $E_b = 3,24$  эВ, коэффициент теплопроводности 490 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 6,5, постоянные решетки  $a = 0,3073$  нм и  $c = 1,511$  нм) характеризовался частотами собственных колебаний молекулярных фрагментов SiC  $\omega_{01} = 15,0 \cdot 10^{13}$  с<sup>-1</sup> (794 см<sup>-1</sup>) и  $18,9 \cdot 10^{13}$  с<sup>-1</sup> (1000 см<sup>-1</sup>). Монокристаллы сапфира (плотность 3,98 г/см<sup>3</sup>,  $E_b = 6,3$  эВ, коэффициент теплопроводности 30,3 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 9,3, постоянные решетки  $a = 0,4758$  нм,  $c = 1,2991$  нм) характеризовались частотами собственных колебаний молекулярных фрагментов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:  $\omega_{01} = 10,8 \cdot 10^{13}$  с<sup>-1</sup> (573 см<sup>-1</sup>),  $12,1 \cdot 10^{13}$  с<sup>-1</sup> (642 см<sup>-1</sup>) и  $14,1 \cdot 10^{13}$  с<sup>-1</sup> (748 см<sup>-1</sup>) [5, 6–7].

Закономерности полирования монокристаллов карбида кремния и сапфира исследовали при использовании водных суспензий из алмазных микропорошков АСМ 2/1 (1), порошков кубического нитрида бора КМ 0,5/0 (2) и порошков МАХ-фазы Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> зернистостью 0,5/0 (3). Использовались также коллоидные системы (КС) из наночастиц предложенных нами химических соединений (4) и традиционных из коллоидного кремнезема (5) на основе дистиллированной воды без добавления кислот, щелочей и поверхностно-активных веществ. Частоты собственных колебаний ( $\omega_{02}$ , см<sup>-1</sup>) молекулярных фрагментов полировальных порошков алмаза – 1135 и 1332, кубического нитрида бора – 1056, 1100 и 1304 и порошков МАХ-фазы Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> – 260, 420, 605, 1320 и 1590. Статическая диэлектрическая проницаемость полировальных порошков алмаза – 5,7, cBN – 2,5 и Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> – 3,5 [5].

**Закономерности нанополитования подложек для оптоэлектроники.** Производительность съема  $Q$  обрабатываемого материала при полировании монокристаллического карбида кремния и сапфира определяли как произведение коэффициента  $\eta$  объемного износа и длины  $L_f$  пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности притиру:  $Q = \eta L_f$ , в зависимости от размеров  $d_i$  частиц шлама и их концентрации на поверхности, номинального давления прижима детали к притиру, скорости их относительного перемещения, площади контакта, коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала и температуры в контактной зоне [5, 8–10].

Результаты расчетов параметров обобщенной модели образования и удаления частиц шлама и съема обрабатываемого материала, а также экспериментальные данные по производительности съема карбида кремния и сапфира, которая определялась весовым методом в мг/мин (мкм/час), приведены в табл. 1, 2.

Таблиця 1

**Производительность полирования монокристаллического карбида кремния**

Параметры взаимодействия SiC с полировальным составом	Полировальный состав			
	АСМ (1)	cBN (2)	КС (4)	Ti <sub>3</sub> AlC <sub>2</sub> (3)
Наиболее вероятный размер частицы шлама $a_v$ , нм	2,4	2,7	2,6	2,4
Энергия переноса $W$ , Дж/кг	$0,6 \cdot 10^{12}$	$1,6 \cdot 10^{12}$	$1,3 \cdot 10^{13}$	$2,7 \cdot 10^{13}$
Плотность энергии переноса $\sigma$ , МДж/м <sup>2</sup>	1,5	4,7	45,0	73,0
Производительность съема $Q$ , расчет: м <sup>3</sup> /с эксперимент: м <sup>3</sup> /с (мкм/час)	$4,7 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$2,0 \cdot 10^{-13}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$
	$4,4 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$2,2 \cdot 10^{-13}$	$9,3 \cdot 10^{-14}$
	15,5	5,5	0,8	0,3
Погрешность расчета, %	7	7	10	5

Результаты анализа данных, приведенных в табл. 1, 2 показали, что производительность полирования монокристаллических материалов зависит от энергии переноса, которая характеризует энергетические затраты на удаление с обрабатываемой поверхности единицы массы обрабатываемого материала [5]. Зависимости интенсивности съема обрабатываемого материала  $Q$  (м<sup>3</sup>/с) от энергии переноса  $W$  (Дж/кг) при полировании карбида кремния и сапфира при помощи различных полировальных составов в логарифмических координатах изображаются в виде параллельных прямых и описываются линейной функцией  $\ln Q = -k_{12} \ln W + b_{12}$  (где  $k_1 = 0,97 \approx 1$ ,  $b_1 = 0,04$ ;  $k_2 = 0,98 \approx 1$ ,  $b_2 = -1,81$  – коэффициенты, определенные методом наименьших квадратов, погрешность аппроксимации – менее 0,5%). Это означает, что производительность полирования монокристаллических карбида кремния и сапфира обратно пропорциональна энергии переноса и может быть описана приближенной зависимостью  $Q = \alpha_{12}/W$  ( $\alpha_1 = \exp(b_1) = 1,04$  – для карбида кремния;  $\alpha_2 = \exp(b_2) = 0,16$  – для сапфира).

Таблиця 2

**Производительность полирования сапфира**

Параметры взаимодействия сапфира с полировальным составом	Полировальный состав				
	Ti <sub>3</sub> AlC <sub>2</sub> (3)	cBN (2)	АСМ (1)	КС (4)	КС (5)
Наиболее вероятный размер ЧШ $a_v$ , нм	2,7	2,9	2,5	2,0	2,0
Энергия переноса $W$ , Дж/кг	$5,2 \cdot 10^{11}$	$5,8 \cdot 10^{11}$	$6,5 \cdot 10^{11}$	$2,9 \cdot 10^{12}$	$3,6 \cdot 10^{12}$
Плотность энергии переноса $\sigma$ , МДж/м <sup>2</sup>	2,0	2,4	2,4	7,4	9,2
Производительность полирования $Q$ , расчет: м <sup>3</sup> /с эксперимент: м <sup>3</sup> /с (мкм/час)	$6,0 \cdot 10^{-13}$	$5,4 \cdot 10^{-13}$	$4,8 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$0,9 \cdot 10^{-13}$
	$5,6 \cdot 10^{-13}$	$5,6 \cdot 10^{-13}$	$4,5 \cdot 10^{-13}$	$1,3 \cdot 10^{-13}$	$0,8 \cdot 10^{-13}$
	1,4	,4	1,0	0,3	0,2
Погрешность, %	7	4	7	17	12

Производительность полирования карбида кремния и сапфира зависит от плотности энергии переноса  $\sigma = W\rho V_s/S_s$  (Дж/м<sup>2</sup>), которая показывает затраты механической энергии на удаление с обрабатываемой поверхности частиц шлама объемом  $V_s$  с площадью поверхности  $S_s$ . В логарифмических координатах эта зависимость является линейной функцией  $\ln Q = k_{34} \ln \sigma + b_{34}$  (где  $k_3 = -0,9$ ,  $b_3 = -12,8$  – для карбида кремния;  $k_4 = -1,3$ ,  $b_4 = -9,5$  – для сапфира – коэффициенты, определенные при помощи метода наименьших квадратов). Из этого следует, что производительность полирования монокристаллического карбида кремния и сапфира обратно пропорциональна энергии, затрачиваемой на удаление частиц шлама с обрабатываемой поверхности, и определяется формулой  $Q = \beta_{12}/\sigma$  ( $\beta_1 = 7,2 \cdot 10^{-6}$  Вт·м – для карбида кремния;  $\beta_2 = 1,1 \cdot 10^{-6}$  Вт·м – для сапфира). Производительность съема обрабатываемого материала при полировании монокристаллов карбида кремния и сапфира различными полировальными суспензиями (1–3) и коллоидными системами (4, 5) характеризуется приближенным соотношением  $Q_1/Q_2 = \alpha_1/\alpha_2 = \beta_1/\beta_2 \approx 6,5$ .

Поскольку энергия переноса  $W$  зависит от коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала, обычно используют приведенную энергию переноса  $W_0 = [\lambda_{K8}/\lambda]W$ , которая характеризует участие частиц шлама в передаче тепловой энергии при обработке карбида кремния или сапфира по отношению к процессу полирования эталонного материала – оптического стекла марки К8 с  $\lambda_{K8} = 0,95$  Вт/(м·К) [5]. Показано, что полирование монокристаллического карбида кремния целесообразно осуществлять при помощи суспензии порошков МАХ-фазы Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> (3) и коллоидной системы из наночастиц (4). Поверхности сапфира можно полировать при помощи суспензий из алмазных микропорошков (1), порошков кубического нитрида бора (2) и

порошков МАХ-фази  $Ti_3AlC_2$  (3), а нанополірованіє следует осуществлѣть при помощи коллоидных систем из наночастиц (4) или (5), что подтверждается многолетним практическим опытом.

Сравнение результатов расчета производительности полирования плоских поверхностей элементов из монокристаллического карбида кремния и сапфира при помощи суспензий из алмазных микропорошков, порошков кубического нитрида бора и порошков МАХ-фази  $Ti_3AlC_2$  с экспериментальными данными показало их хорошую сходимость (отклонение расчетных и экспериментальных результатов составило до 10%, см. табл. 1, 2). Это является подтверждением правомочности применения обобщенной модели образования и удаления частиц шлама и использования в качестве критерия для оценки эффективности процесса полирования приведенной величины энергии переноса.

Анализ закономерностей образования и удаления частиц шлама при финишной обработке неметаллических материалов в рамках физико-статистической модели [5] показал, что размеры частиц, образующихся в процессе полирования, удовлетворяют неравенству  $d_i < R_{max}$ . На основе этого можно считать, что удаление обрабатываемого материала при полировании неметаллических материалов является результатом процессов диспергирования наночастиц. Размеры этих частиц, их концентрация в контактной зоне и характер взаимодействия с частицами полировальных порошков и контактирующими поверхностями притира и детали определяют наиболее вероятный размер частиц шлама [5], а также закономерности формирования шероховатости обработанных поверхностей.

На основе результатов исследования механизма формирования шероховатости обрабатываемой поверхности [5] разработан метод компьютерного моделирования микропрофиля, который обеспечивает хорошую сходимость результатов расчета высоты нанонеровностей с данными эксперимента. Высота нанонеровностей полированной поверхности пропорциональна поверхностной плотности частиц шлама (квадрату модуля функции состояния кластера  $|\psi|^2, m^{-1}$ ) в соответствии с формулой  $z(x) = k|\psi|^2$ , а коэффициент пропорциональности определяется как  $(d_i/2)^2$ .

Для расчета высоты неровностей профиля полированной поверхности, когда линии выступов и впадин практически совпадают со средней линией профилограммы, коэффициент пропорциональности в формуле для расчета нанопрофиля  $z(x)$  определяется как  $d_i^2$ . Функция, определяющая высоту нанонеровностей поверхности в процессе полирования, вдоль базовой линии выражается формулой

$$z(x) = d(k_0)\Phi_{k_0}^2\left(\frac{z}{d(k_0)}\right) + \sum_{i \geq 1}^{G-1} C_{k_i}^2 d(k_i)\Phi_{k_i}^2\left(\frac{z-y_i}{d(k_i)}\right),$$

где  $C_{k_i}$  – постоянные;  $y_i$  – смещение функций состояния ЧШ;  $k_i = \overline{1, M}$  – индексы, определяющие последовательность образования ЧШ размером  $d_i$ ,  $M$  – число групп частиц шлама;

$\Phi_k(x) = [k!2^k \sqrt{\pi}]^{-1/2} e^{-x^2/2} H_k(x)$  – функции параболического цилиндра,  $H_k(x)$  – полиномы Эрмита.

Для расчета нанопрофиля полированной поверхности необходимо и достаточно определить размеры частиц шлама  $d(k_i) = [S_0(k_i + 1)/\pi]^{1/2}$  и функцию их распределения по размерам (распределение Пуассона  $P(i, \nu)$ ). Метод компьютерного моделирования нанопрофиля поверхностей элементов из монокристаллических материалов при полировании основан на методе Монте-Карло. В качестве входной случайной величины используется последовательность чисел  $k_i$ , которая генерируется компьютером в соответствии с распределением  $P(i, \nu)$ . Высота нанонеровностей профиля поверхности  $Z(x)$  определяется на участке  $x \in [0, L]$ .

По модельным профилограммам, полученным методом компьютерного моделирования нанорельефа полированной поверхности, определяются высотные параметры шероховатости: среднее арифметическое

отклонение профиля  $Ra = \frac{1}{L} \int_0^L Z(x) dx$ , среднее квадратичное отклонение профиля  $Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L [z(x)]^2 dx}$  и

наибольшая высота профиля  $R_{max}$ . В результате компьютерного моделирования при усреднении высотных параметров шероховатости по пяти модельным профилограммам получены значения  $Ra, Rq, R_{max}$ , величины отношения  $\chi = R_{max}/Ra$ , а также коэффициенты относительной шероховатости  $k_a = Ra/a_v, k_q = Rq/a_v$  и  $k_m = R_{max}/a_v$ , нормированные на наиболее вероятный размер частицы шлама (табл. 3, 4).

Таблица 3

Параметры шероховатости полированной поверхности карбида кремния

Параметры шероховатости карбида кремния	Полировальный состав			
	АСМ (1)	cBN (2)	$Ti_3AlC_2$ (3)	КС (4)
$Ra$ , нм	5.4±0.1	5.6±0.2	5.1±0.2	4.6±0.1
$Rq$ , нм	5.8±0.2	5.9±0.2	5.4±0.2	4.7±0.1
$R_{max}$ , нм	9.3±0.9	8.2±1.1	7.4±0.5	6.5±0.2
$\chi$	1.7	1.5	1.5	1.4

Продолжение таблицы 3

$k_a$	2.3	2.1	2.1	1.7
$k_q$	2.4	2.2	2.2	1.8
$k_m$	3.9	3.0	3.1	2.5

Таблица 4

## Параметры шероховатости полированной поверхности сапфира

Параметры шероховатости сапфира	Полировальный состав				
	АСМ (1)	cBN (2)	Ti <sub>3</sub> AlC <sub>2</sub> (3)	KC (4)	KC (5)
$Ra$ , нм	6.3±0.3	6.5±0.2	6.4±0.2	2.8±0.2	2.7±0.1
$Rq$ , нм	6.7±0.2	7.0±0.2	6.8±0.3	3.0±0.2	2.9±0.1
$Rmax$ , нм	12.3±0.2	12.8±1.4	12.9±1.0	4.7±0.3	4.7±0.2
$\chi$	1.9	2.0	2.0	1.6	1.7
$k_a$	2.5	2.3	2.3	1.4	1.4
$k_q$	2.7	2.4	2.5	1.5	1.4
$k_m$	4.9	4.4	4.7	2.3	2.3

В результате анализа приведенных данных показано, что параметры шероховатости  $Ra$ ,  $Rq$  и  $Rmax$  уменьшаются при увеличении энергии переноса. Чем больше энергии затрачивается на образование и удаление с обрабатываемой поверхности частиц шлама, тем меньше их размеры и соответственно высота нанопрофиля полированной поверхности. Именно поэтому величина энергии переноса может быть использована в качестве критерия эффективности полирования карбида кремния и сапфира. В табл. 3, 4 приведены значения коэффициентов шероховатости  $k_a$ ,  $k_q$ ,  $k_m$  и  $\chi$ , характеризующих процессы формирования нанопрофиля обработанных поверхностей элементов из карбида кремния и сапфира при полировании полировальными суспензиями (1)–(3) и коллоидными системами (4)–(5).

В отличие от процессов шлифования неметаллов при условии  $d_i > Rmax$ , когда коэффициенты шероховатости  $k_a$ ,  $k_q$ ,  $k_m < 1$  и  $\chi > 1$ , для полирования монокристаллического карбида кремния и сапфира при условии  $d_i \leq Rmax$  эти коэффициенты  $k_a$ ,  $k_q$ ,  $k_m$ ,  $\chi > 1$  и уменьшаются при улучшении качества обработки. Для сравнения эффективности применения различных полировальных составов достаточно найти минимальные значения этих коэффициентов. Минимальными значениями коэффициентов шероховатости  $k_a$ ,  $k_q$ ,  $k_m$ ,  $\chi$  (табл. 3, 4) характеризуется шероховатость поверхностей элементов из карбида кремния, обработанных при помощи коллоидной системы (4), и сапфира, полирование которых осуществлялось при помощи коллоидных систем (4)–(5). Сравнивая значения этих коэффициентов для процессов шлифования и полирования, можно заключить, что коэффициенты шероховатости  $k_m$ ,  $k_q$  и  $k_a$  уменьшаются на 1–2 порядка величины, что позволяет говорить о принципиальных отличиях в механизмах формирования микро- и нанорельефа обрабатываемой поверхности. Сравнивая значения приведенных коэффициентов шероховатости для процессов обработки карбида кремния и сапфира при помощи различных полировальных составов, можно утверждать, что полирование целесообразно осуществлять при помощи суспензий полировальных порошков, а нанополірування – с помощью коллоидных систем из наночастиц.

**Выводы.** В результате теоретических и экспериментальных исследований закономерностей полирования поверхностей карбида кремния и сапфира показано, что в качестве критериев эффективности полирования целесообразно использовать энергию переноса, максимальное значение которой соответствует минимальной шероховатости, и коэффициенты шероховатости, определяющие минимально допустимые значения высотных параметров. Установлено также, что для их полирования целесообразно использовать полировальные суспензии из алмазных микропорошков, порошков кубического нитрида бора и МАХ-фазы Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>, а для нанополірування – коллоидные систем из нанопорошков, в том числе коллоидного кремнезема, что широко используется в мировой практике при производстве элементов оптоэлектроники из монокристаллических материалов. Это подтверждает возможность применения обобщенной физико-статистической модели образования и удаления с обрабатываемой поверхности частиц шлама к процессам полирования карбида кремния и сапфира.

**Анотація.** В результаті дослідження полірування монокристалічних матеріалів показано, що полірування плоских поверхонь оптоелектронних елементів з монокристалів карбиду кремнію доцільно здійснювати з використанням полірувальної суспензії порошків на основі МАХ-фазу Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> та колоїдних систем наночастинок, а монокристалів сапфіру – за допомогою суспензії з алмазних мікропорошків, порошків кубічного нітриду бору та МАХ-фазу Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>. Нанополірування поверхонь елементів монокристалів сапфіру слід здійснювати при використанні колоїдної системи наночастинок або традиційних складів на основі

колоїдного двооксиду кремнію. Показано також, що продуктивність полірування монокристалів карбіду кремнію та сапфіру обернено пропорційна енергії переносу, максимальне значення якої відповідає мінімальній шорсткості.

Ключові слова: полірування; монокристали; наночастинки; колоїдна система; шорсткість.

**Abstract.** As a result of research of polishing single crystal materials it was shown that the polishing flat surfaces of optoelectronic elements of single crystal silicon carbide is advantageously carried out by using a polishing slurry of the powders based on MAX-phase  $Ti_3AlC_2$  and colloidal nanoparticulate systems, and single crystal sapphire - using suspensions of diamond micron powders of the cubic boron nitride powders and MAX-phase  $Ti_3AlC_2$ . Nano-polishing surfaces of elements of single crystal sapphire should be performed using colloidal nanoparticulate systems or traditional formulations based on colloidal silica. It is also shown that the polishing efficiency of single crystal silicon carbide and sapphire is inversely proportional to the transfer energy, the maximum value of which correspond to a minimum roughness.

Keywords: polished; Single crystals; nanoparticles; colloidal system; roughness.

#### Библиографический список использованной литературы

1. Yaguo Li, Yongbo Wu, Jian Wang, Wei Yang, Yinbiao Guo, and Qiao Xu, Tentative investigation towards precision polishing of optical components with ultrasonically vibrating bound-abrasive pellets // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20. – No. 1. – P. 568–258.
2. Yaguo Li, Yongbo Wu, Libo Zhou, Masakazu Fujimoto, Vibration-assisted dry polishing of fused silica using a fixed-abrasive polisher / *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2014. – Vol. 77. – P. 93–102.
3. Y. Ling, Low-Damage Grinding / Polishing of Silicon Carbide Surfaces, SIMTech Technical Report (PT/01/001/PM).
4. Filatov Y.D., Filatov O.Yu., Monteil G. et al., Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials / *Optical Engineering*, 2011. – Vol. 50, Issue 6, P. 063401–063401–7.
5. Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Filatov Y.D., Vetrov A.G. Polishing substrates of single crystal silicon carbide and sapphire for optoelectronics / *Functional materials*. – 2016. – V. 23. – No. 1. – P. 104–110.
6. Wang Y., Liu S., Peng G., Zhou S., Xu J., Effects of surface treatment on sapphire substrates // *Journal of Crystal Growth*. – 2005. – Vol. 274. – P. 241–245.
7. Kadleikova M., Breza J., Vesely M., Raman spectra of synthetic sapphire // *Microelectronics Journal*. – 2001. – No. 32. – P. 955–958.
8. Zhu H., Tessaroto L.A., Sabia R., Greenhut V.A., Smith M., Niesz D.E., Chemical mechanical polishing (CMP) anisotropy in sapphire // *Applied Surface Science*. – 2004. –V. 236. – Issue 1–4. – P. 120–130.
9. Budnikov A.T., Vovk E.A., Krivonogov S.I., Danko A. Ya., Lukiyenko O.A., Anisotropy of sapphire properties associated with chemical-mechanical polishing with silica // *Functional Materials*. – 2010. – Vol. 17. – No. 4. – P. 488–494.
10. Vovk E.A., Chemical-mechanical polishing of sapphire by polishing suspension based on aerosol // *Functional Materials*. – 2015. – Vol. 22. – No. 2. – P. 252–257.

#### References

1. Yaguo Li, Yongbo Wu, Jian Wang, Wei Yang, Yinbiao Guo, and Qiao Xu, (2012). *Tentative investigation towards precision polishing of optical components with ultrasonically vibrating bound-abrasive pellets*. *Optics Express*. Vol. 20. No. 1. pp. 568–258.
2. Yaguo Li, Yongbo Wu, Libo Zhou (2014) Masakazu Fujimoto, Vibration-assisted dry polishing of fused silica using a fixed-abrasive polisher. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 77. pp. 93–102.
3. Ling Y., Low-Damage Grinding. Polishing of Silicon Carbide Surfaces, SIMTech Technical Report (PT/01/001/PM).
4. Filatov, Y.D., Filatov, O.Yu., Monteil G. et al. (2011), *Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials*. *Optical Engineering*, Vol. 50, Issue 6, pp. 063401–063401–7.
5. Filatov, O.Yu., Sidorko, V.I., Kovalev, S.V., Filatov, Y.D., Vetrov, A.G. (2016), *Polishing substrates of single crystal silicon carbide and sapphire for optoelectronics*. *Functional materials*. V. 23, No. 1, pp. 104–110.
6. Wang, Y., Liu, S., Peng, G., Zhou, S., Xu, J., (2005), ‘Effects of surface treatment on sapphire substrates’, *Journal of Crystal Growth*. Vol. 274. pp. 241–245.
7. Kadleikova M., Breza J., Vesely M. (2001), ‘Raman spectra of synthetic sapphire’. *Microelectronics Journal*, No. 32, pp.955–958.
8. Zhu, H., Tessaroto, L.A., Sabia, R., Greenhut, V.A., Smith, M., Niesz, D.E. (2004), *Chemical mechanical polishing (CMP) anisotropy in sapphire*. *Applied Surface Science*. V. 236, Issue 1–4, pp. 120–130.
9. Budnikov, A.T., Vovk, E.A., Krivonogov, S.I., Danko, A. Ya., Lukiyenko, O.A. (2010), Anisotropy of sapphire properties associated with chemical-mechanical polishing with silica. *Functional Materials*, Vol. 17, No. 4, pp. 488–494.
10. Vovk, E.A. (2015), *Chemical-mechanical polishing of sapphire by polishing suspension based on aerosol*. *Functional Materials*, Vol. 22, No. 2, pp. 252–257.

Подана до редакції 12.04.2016