

# Исследование процессов обработки

УДК 621.623

**А. Ю. Филатов\*, В. И. Сидорко, С. В. Ковалев,  
Ю. Д. Филатов, А. Г. Ветров**

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля  
НАН Украины, г. Киев, Украина  
*\*filatov.alexandr@gmail.com*

## **Производительность полирования анизотропных монокристаллических материалов для оптоэлектроники**

*В результате исследований закономерностей формирования прецизионных поверхностей элементов из анизотропных монокристаллических материалов для оптоэлектронной техники сформулирована обобщенная модель съема обрабатываемого материала при полировании суспензиями полировальных порошков. Установлено, что производительность полирования плоскостей сапфира с различной кристаллографической ориентацией возрастает в ряду  $t < c < a < r$  при увеличении объема, площади поверхности и наиболее вероятно размера частиц шлама, а также энергии диспергирования материала с обрабатываемой грани.*

**Ключевые слова:** полирование, частица шлама, энергия переноса.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Финишная обработка монокристаллических материалов осуществляется на операциях тонкого шлифования при помощи алмазных и абразивных порошков в связанном или свободном состоянии, супертонкого шлифования при помощи суспензий из алмазных микропорошков, порошков оксидов металлов и редкоземельных элементов [1, 2]. Операция полирования также осуществляется в несколько переходов (грубое полирование, предварительное полирование, полирование и нанополирование) при помощи суспензий из алмазных и полировальных порошков [2, 3]. При финишной алмазно-абразивной обработке прецизионных поверхностей элементов и подложек из монокристаллов сапфира, карбида кремния, полупроводниковых нитридов, оптической керамики и других кристаллических материалов высокая точность формы и очень низкая шероховатость обработанной поверхности должна достигаться стабильно во времени и с высокой производительностью [4–6]. Наиболее важным показателем процесса полирования прецизионных

© А. Ю. ФИЛАТОВ, В. И. СИДОРКО, С. В. КОВАЛЕВ, Ю. Д. ФИЛАТОВ, А. Г. ВЕТРОВ, 2016

поверхностей элементов оптико-электронной техники из монокристаллических материалов является качество обработки, которое характеризуется шероховатостью, отражающей и рассеивающей способностью обработанной поверхности, а также образованием налета из частиц шлама и частиц износа инструментального материала [7–12].

Повышение производительности полирования прецизионных поверхностей элементов оптико-электронной техники из монокристаллических материалов при обязательном удовлетворении требований к качеству обработанных поверхностей может быть достигнуто только благодаря разработке и использованию новых полировальных суспензий, оптимизация состава и характеристик которых является актуальной задачей [13–15].

Целью исследования было изучение влияния свойств обрабатываемого монокристаллического материала и полировального порошка в суспензии на производительность полирования поверхностей монокристаллов с различной кристаллографической ориентацией.

### ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПОЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Для определения производительности съема обрабатываемого материала при полировании прецизионных поверхностей элементов оптико-электронной техники при помощи полировальных суспензий в настоящее время используется обобщенная модель съема обрабатываемого материала при полировании, основанная на кластерной модели износа твердых тел при трении и физико-статистической модели образования и удаления с обрабатываемой поверхности частиц шлама [16–20]. Расчет производительности съема обрабатываемого материала  $Q$  при полировании осуществляется, исходя из технологических параметров процесса обработки (давление прижима детали к полировальнику, скорости их относительного перемещения, площади контакта поверхностей полировальника и детали, температуры в контактной зоне) и характеристик обрабатываемого материала и полировального порошка (коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала, площади поверхности частиц шлама, среднего размера зерен полировального порошка) по формуле [1, 3]

$$Q = \eta L_T, \quad (1)$$

где  $\eta$  – коэффициент объемного износа [20];  $L_T$  – длина пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности полировальника.

Коэффициент  $\eta$  объемного износа, входящий в формулу (1), в зависимости от размеров  $d(i)$  частиц шлама и времени их контакта с поверхностью зерна полировального порошка  $t_k$  рассчитывается по формуле

$$\eta = \sum_{i=1}^m \frac{d(i)^2}{4\beta(i)t_k},$$

где значения безразмерной величины  $\beta(i)$  определяются как корни  $m$  трансцендентных уравнений

$$\frac{\exp(-\beta(i)^2)}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\beta(i))} = \frac{1}{N(i) S_i} \sqrt{L_T d S_k \vartheta},$$

где  $N(i)$  – количество  $i$ -х частиц шлама на обрабатываемой поверхности;  $S_i$  – площадь поверхности  $i$ -й частицы шлама;  $d$  – средний размер зерен полиро-

вального порошка;  $S_k$  – площадь контакта поверхностей полировальника и детали;  $\vartheta = \frac{\lambda TL_T}{\rho u S_k}$  – безразмерный параметр;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала;  $T$  – температура в контактной зоне;  $p$  – номинальное давление прижима полировальника к детали;  $u$  – скорость их относительного перемещения [1, 3, 16, 17, 20].

Количество  $i$ -х частиц шлама на площади  $S_k$  за время контакта зерна полировального порошка с обрабатываемой поверхностью  $t_k = d/u$  с учетом их распределения по площадям поверхности определяли по формуле

$$N(i) = \frac{A_L}{4\hbar\pi^3 l_0^2} S_k t_k P(i, \nu), \quad (2)$$

где  $A_L = \hbar \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{[\varepsilon_1(\omega_{lk}) - \varepsilon_3][\varepsilon_2(\omega_{lk}) - \varepsilon_3]}{[\varepsilon_1(\omega_{lk}) + \varepsilon_3][\varepsilon_2(\omega_{lk}) + \varepsilon_3]} d\Omega$  – константа Лифшица;  $\hbar =$

$1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;  $\omega_{lk} = \frac{3\omega_{01l}\omega_{02k}}{2(\omega_{01l} + \omega_{02k})}$  – характерная час-

тота;  $\Omega \in [\omega_1; \omega_2]$  – частотный интервал;  $\omega_{01l}$  и  $\omega_{02k}$  – частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов обрабатываемого и инструментального материалов;  $l, k$  – порядковые номера частот;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – значения минимальной и максимальной частот;  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – диэлектрические проницаемости обрабатываемого и инструментального материалов;  $\varepsilon_3$  – диэлектрическая проницаемость полировальной суспензии;  $P(i, \nu) = \frac{e^{-\nu} \nu^i}{i!}$  – распределение частиц

шлама по площадям поверхности (распределение Пуассона);  $\nu = E_b/E_c$  – параметр распределения;  $E_b$  – энергия связи обрабатываемого материала;

$E_c = \hbar \sum_{lk} [\omega_{01l} \xi_{lk}]$  – энергия кластера;  $\xi = \sum_{lk} \left[ \frac{\omega_{01l}^2}{\omega_{01l}^2 - \omega_{02k}^2} \right]^2$  – число молеку-

лярных фрагментов,  $l_0$  – толщина зазора между поверхностями полировальника и детали, заполненного полировальной суспензией, определяемая размером зерен полировального порошка.

В связи с тем, что элементарный акт износа поверхности представляется как переход кластера из связанного состояния в свободное, результатом переходов между эквидистантно расположенными энергетическими уровнями является образование частиц шлама, площади поверхности которых могут принимать определенные дискретные значения, а площадь поверхности  $i$ -ой частицы шлама определяется как  $S_i = S_0(i + 1)$  [1, 3] ( $i = 1, N$ ;  $N$  – число выборок;  $S_0$  – минимальная площадь поверхности кластера, которая зависит от структуры обрабатываемого материала и числа молекулярных фрагментов  $\xi$ ). Наиболее вероятное значение площади поверхности частицы шлама определяется, исходя из распределения Пуассона, в соответствии с формулой

$S = \sum_i S_i P(i, \nu)$ . Частица шлама представляется в виде параллелепипеда, дли-

на сторон которого определяется числом молекулярных фрагментов  $\xi = k_1 k_2 k_3$  ( $k_1, k_2, k_3$  – целые числа), из которых он состоит. Наиболее вероятный размер частицы шлама определяется по формуле  $a_v = \sum_i d(i) P(i, \nu)$ . Размер  $i$ -ой час-

тицы шлама определяется по аналогии с диаметром Фере для плоских фигур как диаметр сферы, площадь поверхности которой равна площади поверхности частицы шлама, в соответствии с формулой  $d(i) = (S_i/\pi)^{1/2}$ .

### ПОЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОСТЕЙ КРИСТАЛЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ

Интенсивность съема обрабатываемого материала в процессе полирования поверхностей оптоэлектронных элементов из монокристаллических материалов существенно зависит от кристаллографической ориентации плоскости монокристалла, которая подвергается полированию [13, 14, 21, 22]. Рассматривая кристаллы с гексагональной структурой, например сапфир (плотность  $\rho = 3,98 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ , энергия атомизации – 731 ккал/моль, энергия связи  $E_b = 6,3 \text{ эВ}$ , постоянные решетки  $a = 0,4758 \text{ нм}$ ,  $c = 1,2991 \text{ нм}$ ,  $c/a = 2,73$  [21–23]), 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 в проекциях на оси координат  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответствующими межплоскостными расстояниями  $\Delta x = 1,5a$ ,  $\Delta y = a\sqrt{3}$  и  $\Delta z = c/6$ , минимальная площадь поверхности частиц определяется по формуле  $S_{0c} = a\xi \left( \frac{3a\sqrt{3}}{k_3} + \frac{c}{2k_2} + \frac{2c}{\sqrt{3}k_1} \right)$ , а расстояние между соседними плоскостями  $c$  со-

ставляет  $l_c = 0,2165 \text{ нм}$ . При полировании плоскости  $a$   $\{11\bar{2}0\}$  число молекулярных фрагментов определяется межплоскостными расстояниями  $\Delta x = a\sqrt{3}$ ,  $\Delta y = a/2$  и  $\Delta z = c$ , минимальная площадь поверхности частиц  $S_{0a} = a\xi \left( \frac{a\sqrt{3}}{k_3} + \frac{2\sqrt{3}c}{k_2} + \frac{c}{k_1} \right)$ , а расстояние между соседними плоскостями  $a$  состав-

ляет  $l_a = 0,2379 \text{ нм}$ . При обработке плоскости  $m$   $\{10\bar{1}0\}$  (расстояние между плоскостями  $m$  – 0,4121 нм) частицы шлама минимального размера образуются при удалении обрабатываемого материала, заключенного между плоскостями  $\{30\bar{3}0\}$ , число молекулярных фрагментов в них определяется межплоскостными расстояниями  $\Delta x = 1,5a$ ,  $\Delta y = a/2\sqrt{3} = 0,1374 \text{ нм}$  и  $\Delta z = c$ , а минимальная площадь  $S_{0m} = a\xi \left( \frac{\sqrt{3}a}{2k_3} + \frac{2c}{3k_2} + \frac{7c}{3k_1} \right)$ . При полировании плоско-

сти  $r$   $\{10\bar{1}2\}$  число молекулярных фрагментов определяется межплоскостными расстояниями  $\Delta x = \sqrt{3a^2 + c^2}$ ,  $\Delta y = 3a/2$  и  $\Delta z = \frac{ac\sqrt{3}}{2\sqrt{3a^2 + c^2}}$ , минимальная площадь поверхности частиц определяется как  $S_{0r} = a\xi \left( \frac{3\sqrt{3a^2 + c^2}}{k_3} + \frac{c\sqrt{3}}{k_2} \sqrt{\frac{c^2 + 4a^2}{c^2 + 3a^2}} + \frac{ac\sqrt{3}}{\sqrt{3a^2 + c^2}} \frac{1}{k_1} \right)$ , а расстояние между сосед-

ними плоскостями  $r$  составляет  $l_r = 0,3479 \text{ нм}$ .

Согласно принципу Гиббса-Кюри равновесной (наиболее устойчивой) формой кристалла является та, поверхностная энергия которой при данном

объеме – наименьшая. То есть, частица шлама, образовавшаяся при полировании кристалла, характеризуется минимальной поверхностной энергией  $\sigma = \sum_n \sigma_{0n} S_{gn}$  ( $\sigma_0$  и  $S_g$  – поверхностная энергия и площадь  $n$ -й грани соответственно) [24]. Исходя из приведенных в [21] значений поверхностной энергии для граней  $c$ ,  $a$ ,  $m$  и  $r$  сапфира –  $\sigma_{0c}$ ,  $\sigma_{0a}$ ,  $\sigma_{0m}$  и  $\sigma_{0r}$ , можно определить поверхностную энергию частиц шлама при полировании соответствующей плоскости кристалла по формулам

$$\sigma_c = a\xi \left( \frac{3a\sigma_{0c}\sqrt{3}}{k_3} + \frac{c\sigma_{0m}}{2k_2} + \frac{2c\sigma_{0a}}{\sqrt{3}k_1} \right); \quad (3)$$

$$\sigma_a = a\xi \left( \frac{a\sigma_{0c}\sqrt{3}}{k_3} + \frac{2\sqrt{3}c\sigma_{0a}}{k_2} + \frac{c\sigma_{0m}}{k_1} \right); \quad (4)$$

$$\sigma_m = a\xi \left( \frac{\sqrt{3}a\sigma_{0c}}{2k_3} + \frac{2c\sigma_{0a}}{3k_2} + \frac{7c\sigma_{0m}}{3k_1} \right); \quad (5)$$

$$\sigma_r = a\xi \left( \frac{3\sqrt{3a^2+c^2}}{k_3} \sigma_{0r} + \frac{c\sqrt{3}}{k_2} \sqrt{\frac{c^2+4a^2}{c^2+3a^2}} \sigma_{0a} + \frac{ac\sqrt{3}}{\sqrt{3a^2+c^2}} \frac{1}{k_1} \sigma_{0m} \right). \quad (6)$$

Поверхностная энергия частиц шлама, удаляемых в процессе полирования плоскостей  $c$ ,  $a$ ,  $m$  и  $r$ , определяемая в соответствии с формулами (3)–(6), является функцией чисел  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , которые определяют размеры частиц в проекциях на оси координат  $x$ ,  $y$  и  $z$ .

Исходя из условия минимального значения  $\sigma$  и  $k_3 = \xi/k_1k_2$ , определение численных значений  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  сводится к решению системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma}{\partial k_1} = 0; \\ \frac{\partial \sigma}{\partial k_2} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Для определения размеров частиц шлама, которые образуются в процессе полирования плоскостей  $c$ ,  $a$ ,  $m$  и  $r$ , в результате решения системы уравнений (7) можно получить значения  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  для каждой из них:

для плоскости  $c$

$$k_1 = \frac{2}{3} \sqrt[3]{\sqrt{3}\xi \left( \frac{\sigma_a^2}{\sigma_m\sigma_c} \right) \left( \frac{c}{a} \right)};$$

$$k_2 = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{\xi}{3} \left( \frac{\sigma_m^2}{\sigma_a\sigma_c} \right) \left( \frac{c}{a} \right)};$$

$$k_3 = 3\sqrt[3]{\sqrt{3}\xi\left(\frac{\sigma_c^2}{\sigma_a\sigma_m}\right)\left(\frac{a}{c}\right)^2},$$

для плоскости *a*

$$k_1 = 3\sqrt[3]{\frac{\xi}{6}\left(\frac{\sigma_m^2}{\sigma_a\sigma_c}\right)\left(\frac{c}{a}\right)};$$

$$k_2 = 3\sqrt[3]{\frac{12\xi}{\sqrt{3}}\left(\frac{\sigma_a^2}{\sigma_c\sigma_m}\right)\left(\frac{c}{a}\right)};$$

$$k_3 = 3\sqrt[3]{\frac{\sqrt{3}}{2}\xi\left(\frac{\sigma_c^2}{\sigma_a\sigma_m}\right)\left(\frac{a}{c}\right)^2},$$

для плоскости *m*

$$k_1 = 3\sqrt[3]{\frac{49}{9}\sqrt{3}\xi\left(\frac{\sigma_m^2}{\sigma_c\sigma_a}\right)\left(\frac{c}{a}\right)};$$

$$k_2 = 3\sqrt[3]{\frac{8}{21\sqrt{3}}\xi\left(\frac{\sigma_a^2}{\sigma_m\sigma_c}\right)\left(\frac{c}{a}\right)};$$

$$k_3 = 3\sqrt[3]{\frac{27}{56}\xi\left(\frac{\sigma_c^2}{\sigma_a\sigma_m}\right)\left(\frac{a}{c}\right)^2},$$

для плоскости *r*

$$k_1 = 3\sqrt[3]{\frac{a^2\xi}{\sqrt{3}(c^2+3a^2)}\left(\frac{\sigma_m^2}{\sigma_a\sigma_r}\right)\left(\frac{c}{\sqrt{c^2+4a^2}}\right)};$$

$$k_2 = 3\sqrt[3]{\frac{\xi(c^2+4a^2)}{\sqrt{3}(c^2+3a^2)}\left(\frac{\sigma_a^2}{\sigma_r\sigma_m}\right)\left(\frac{c}{a}\right)};$$

$$k_3 = 3\sqrt[3]{\frac{3\xi}{a\sqrt{c^2+4a^2}}\left(\frac{\sigma_r^2}{\sigma_a\sigma_m}\right)\left(\frac{c^2+3a^2}{c}\right)^2}.$$

Ниже приведены результаты анализа процесса полирования пластин из сапфира с различной кристаллографической ориентацией при помощи суспензии порошка кубического нитрида бора по традиционной технологии, в соответствии с которой плоские поверхности цилиндрических окон диаметром 25 мм (21 шт.), дискретно закрепленные на блоке диаметром 230 мм, полировали на полировальнике диаметром 350 мм при частоте вращения полировальника 40 об./мин, частоте вращения блока деталей 36 об./мин, частоте осциллирующего движения 45 дв. ход./мин, давлении прижима детали к инструменту 26,2 кПа, смещении 30 мм, несимметрии штриха 5 мм, длине

штриха 160 мм и средней температуре в зоне контакта 300 К. При этом учтены следующие характеристики сапфира и кубического нитрида бора (сBN). Частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов сапфира, определенные по спектрам комбинационного рассеяния и инфракрасным спектрам поглощения, составляют:  $\omega_{01} = 10,8 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$  ( $573 \text{ см}^{-1}$ ),  $12,1 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$  ( $642 \text{ см}^{-1}$ ) и  $14,1 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$  ( $748 \text{ см}^{-1}$ ) [22, 25]. Частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов полировального порошка сBN:  $\omega_{02} = 19,9 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$  ( $1056 \text{ см}^{-1}$ ),  $20,7 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$  ( $1100 \text{ см}^{-1}$ ) и  $24,6 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$  ( $1304 \text{ см}^{-1}$ ) [3, 26].

Статическая диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda_r$  для плоскости  $r$  сапфира были рассчитаны по формуле 
$$\begin{pmatrix} \epsilon_r \\ \lambda_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_c - \epsilon_a \\ \lambda_c - \lambda_a \end{pmatrix} \cos \alpha \quad (\alpha = 57,6^\circ - \text{угол между плоскостями } r \text{ и } c \text{ [21, 23]}).$$

Значения статической диэлектрической проницаемости плоскостей  $c$ ,  $m$ ,  $a$  и  $r$  сапфира составляют 11,5, 9,3, 9,3 и 10,5 соответственно. Статическая диэлектрическая постоянная сBN – 2,5 [3]. Коэффициенты теплопроводности плоскостей  $c$ ,  $m$ ,  $a$  и  $r$  сапфира составляют 32,5, 30,3, 30,3 и 31,5 Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> соответственно.

Результаты расчета параметров взаимодействия плоских поверхностей пластин из сапфира с различной кристаллографической ориентацией с полировальным порошком КМ 05/0 приведены в таблице.

### Результаты расчета производительности полирования элементов из сапфира

Параметры	Обрабатываемая плоскость сапфира			
	$m \{10\bar{1}0\}$	$c \{0001\}$	$a \{11\bar{2}0\}$	$r \{10\bar{1}2\}$
Площадь плоскости $S_p$ , нм <sup>2</sup>	3,5	7,1	8,0	11,0
Поверхностная энергия грани $\sigma_0$ , Дж·м <sup>-2</sup> [21]	7,126	3,357	3,858	3,456
Поверхностная энергия частицы шлама $\Sigma$ , Дж·м <sup>-2</sup>	4,34	4,36	4,31	4,30
Число молекулярных фрагментов в кластере $\xi = k_1 k_2 k_3 = 72$	(19–20)× (2–3)×(1–2)	4×3×6	5×(9–10)× (1–2)	(2–3)× 4×(7–8)
Наиболее вероятный размер частицы шлама $a_v$ , нм	4,0	4,5	5,1	5,6
Площадь поверхности частицы шлама $S$ , нм <sup>2</sup>	53,4	68,0	86,0	104,6
Минимальная площадь поверхности частицы шлама $S_0$ , нм <sup>2</sup>	27,0	34,4	43,5	52,9
Объем частицы шлама $V$ , нм <sup>3</sup>	9,0	9,2	18,1	28,7
Коэффициент объемного износа $\eta$ , м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup>	$1,7 \cdot 10^{-11}$	$1,9 \cdot 10^{-11}$	$2,5 \cdot 10^{-11}$	$2,8 \cdot 10^{-11}$
Энергия переноса $W$ , Дж·кг <sup>-1</sup>	$13,0 \cdot 10^{10}$	$13,0 \cdot 10^{10}$	$9,1 \cdot 10^{10}$	$8,5 \cdot 10^{10}$
Производительность съема, м <sup>3</sup> ·с <sup>-1</sup>	$0,79 \cdot 10^{-11}$	$0,84 \cdot 10^{-11}$	$1,11 \cdot 10^{-11}$	$1,24 \cdot 10^{-11}$
мкм·ч <sup>-1</sup>	2,7	3,0	3,9	4,3

В результате компьютерного моделирования процесса полирования плоскостей сапфира с различной кристаллографической ориентацией установлено, что производительность полирования возрастает при увеличении наиболее вероятного размера, площади поверхности и объема частиц шлама (см. таблицу) [16, 17]. Зависимость производительности полирования плоскостей  $m$ ,  $c$ ,  $a$ ,  $r$  сапфира от площади поверхности частиц шлама (рис. 1) может быть аппроксимирована линейной функцией  $Q = k_1 S + b_1$  ( $k_1 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $b_1 = 2,1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  – коэффициенты, определенные при помощи метода наименьших квадратов; погрешность аппроксимации 3 %).

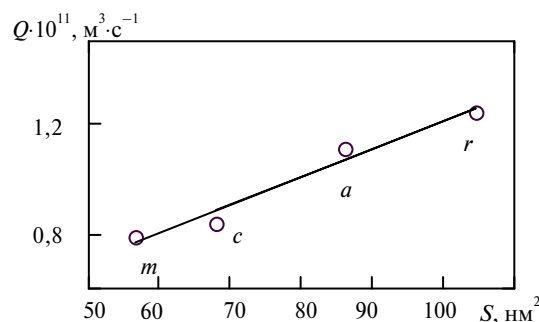


Рис. 1. Зависимость производительности полирования плоскостей сапфира с различной кристаллографической ориентацией от площади поверхности частиц шлама.

Анизотропия свойств обрабатываемого монокристаллического материала обуславливает зависимость коэффициента объемного износа, а значит и интенсивности съема, от кристаллографической ориентации обрабатываемой плоскости (грани кристалла). Зависимость производительности полирования плоскостей  $m$ ,  $c$ ,  $a$ ,  $r$  сапфира от энергии диспергирования  $E_d = \sigma_0 S_n$  материала обрабатываемой грани (рис. 2) описывается также линейной функцией  $Q = k_2 E_d + b_2$  ( $k_2 = 5,1 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $b_2 = 5,7 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  – коэффициенты, определенные при помощи метода наименьших квадратов; погрешность аппроксимации 3 %), которая показывает, что чем больше энергии затрачивается на процесс диспергирования обрабатываемого материала, тем больше производительность полирования.

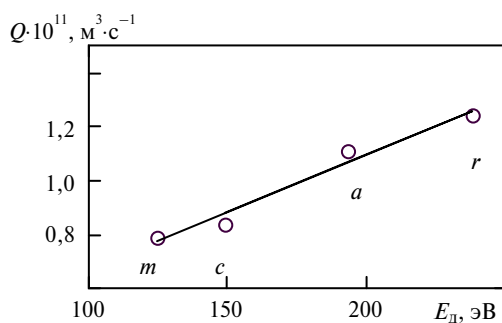


Рис. 2. Зависимость производительности полирования плоскостей сапфира с различной кристаллографической ориентацией от энергии диспергирования материала обрабатываемой грани.

Поверхностная энергия  $\Sigma$  частиц шлама, образовавшихся в процессе полирования плоскостей кристалла с различной кристаллографической ориен-



тацией, умноженная на минимальную площадь поверхности частицы  $S_0$ , определяет величину энергии диспергирования  $W_d = \Sigma S_0$ , которая затрачивается на образование и удаление с соответствующей грани кристалла одной частицы шлама. Чем больше эта энергия, тем интенсивнее происходит съём обрабатываемого материала в процессе полирования. Приведенная на рис. 3 зависимость производительности полирования плоскостей  $m$ ,  $c$ ,  $a$ ,  $r$  сапфира с различной кристаллографической ориентацией от энергии диспергирования частиц шлама может быть аппроксимирована линейно-возрастающей функцией вида  $Q = k_3 W_d + b_3$  ( $k_3 = 7,1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3 \cdot \text{эВ}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $b_3 = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  – коэффициенты, определенные при помощи метода наименьших квадратов; погрешность аппроксимации 4 %).

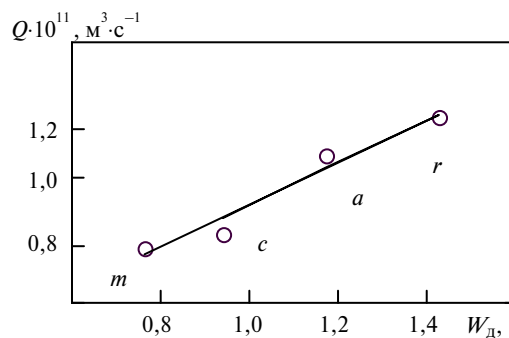


Рис. 3. Зависимость производительности полирования плоскостей сапфира с различной кристаллографической ориентацией от энергии диспергирования частиц шлама.

Производительность полирования плоскостей  $m$ ,  $c$ ,  $a$ ,  $r$  сапфира зависит от энергии переноса  $W = \lambda T / \eta \rho$  ( $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ ), которая характеризует энергию, переносимую частицами шлама с обрабатываемой поверхности в контактную зону. В связи с тем, что энергия переноса  $W$  зависит от режимных и кинематических параметров процесса полирования, реологических характеристик суспензий полировальных порошков и коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала, обычно пользуются величиной приведенной энергии переноса  $W_0 = (\lambda_{\text{к8}} / \lambda) W$ , которая характеризует участие частиц шлама в передаче тепловой энергии при обработке сапфира по отношению к процессу обработки эталонного материала – оптического стекла марки К8, у которого  $\lambda_{\text{к8}} = 0,95 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  [1, 3, 20]. Зависимость величины приведенной энергии переноса  $W_0$  в логарифмическом масштабе представляется линейной функцией  $\lg Q = -k_3 \lg W_0 + b_3$  ( $k_3 = 0,95$ ,  $b_3 = -1,97$  – коэффициенты, определенные при помощи метода наименьших квадратов), которая позволяет оценивать эффективность процесса полирования, используя в качестве критерия величину энергии переноса [1, 3] (рис. 4).

Значения приведенной энергии переноса, характерные для полирования плоскостей сапфира с разной кристаллографической ориентацией при помощи суспензии полировальных порошков КМ 05/0, попадают в интервал  $9,4 < \lg W_0 < 9,6$ , соответствующий классическому процессу полирования оптических поверхностей [1, 3, 20]. Относительная производительность съема обрабатываемого материала при полировании плоскостей сапфира с различной кристаллографической ориентацией (по отношению к плоскости  $m$ )  $q = Q/Q_m$  характеризуется соотношением  $q_m : q_c : q_a : q_r = 1,00 : 1,06 : 1,41 : 1,57$  и увеличивается в ряду  $m < c < a < r$ .

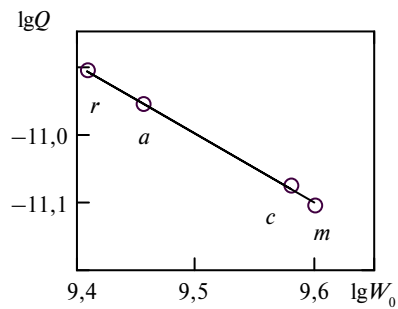


Рис. 4. Зависимость производительности полирования плоскостей сапфира с различной кристаллографической ориентацией от приведенной энергии переноса.

При изучении влияния кристаллографической ориентации обрабатываемой плоскости на производительность полирования сапфира в [27] установлена закономерность увеличения интенсивности съема обрабатываемого материала при полировании в ряду  $c < a < r$ , который соответствует приведенному выше соотношению. Экспериментальное измерение величины съема сапфира весовым методом показало, что при полировании плоскостей  $r$ ,  $a$  и  $c$  суспензией алмазных порошков  $RDDM$  4–8,  $RDDM$  2–4,  $RDDM$  0,25–0,50 на полировальниках из каучукового материала и пеко-канифольной смолы [27] соотношения средних значений производительности полирования этих плоскостей составляют  $q_r/q_a = 1,15$ ,  $q_r/q_c = 1,53$ ,  $q_a/q_c = 1,33$  соответственно, и практически совпадают с полученными теоретическими соотношениями  $(q_r/q_a)_t = 1,11$ ,  $(q_r/q_c)_t = 1,48$ ,  $(q_a/q_c)_t = 1,33$  (отклонение расчетных и экспериментальных данных не превышает 4 %).

### ВЫВОДЫ

В результате теоретических и экспериментальных исследований закономерностей процесса формирования прецизионных поверхностей элементов из анизотропных монокристаллических материалов для оптоэлектронной техники сформулирована обобщенная модель съема обрабатываемого материала при полировании с помощью суспензии полировального порошка. На основе этой модели применительно к монокристаллам сапфира изучено влияние кристаллографической ориентации обрабатываемой плоскости на производительность полирования. Установлено, что производительность полирования сапфира возрастает при увеличении объема, площади поверхности и наиболее вероятного размера частиц шлама, а также энергии диспергирования материала с обрабатываемой грани. Показано также, что зависимость производительности полирования плоскостей  $m$ ,  $c$ ,  $a$  и  $r$  сапфира с различной кристаллографической ориентацией от энергии переноса в логарифмическом масштабе является линейной функцией. Используя величину приведенной энергии переноса в качестве критерия эффективности съема обрабатываемого материала, показано, что полирование плоскостей  $m$ ,  $c$ ,  $a$  и  $r$  сапфира суспензией порошка кубического нитрида бора по традиционной технологии соответствует классическому процессу полирования оптических поверхностей. Относительная производительность съема обрабатываемого материала при полировании плоскостей  $m$ ,  $c$ ,  $a$  и  $r$  сапфира с различной кристаллографической ориентацией характеризуется соотношением 1,00:1,06:1,41:1,57.

*В результаті дослідження закономірностей формування прецизійних поверхонь елементів з анізотропних монокристалічних матеріалів для оптоелектронної*

техніки сформульована узагальнена модель зняття оброблюваного матеріалу при поліруванні суспензіями полірувальних порошків. Встановлено, що продуктивність полірування площин сапфіру з різною кристалографічною орієнтацією зростає в ряду  $m < c < a < r$  при збільшенні об'єму, площі поверхні та найбільш ймовірного розміру частинок шламу, а також енергії диспергування матеріалу з грані, що оброблюється.

**Ключові слова:** полірування, частинка шламу, енергія переносу.

*The studies of regularities of formation of elements of precision surfaces of anisotropic single crystal materials for optoelectronic technology formulated generalized model of the processed material removal during polishing slurries polishing powders. It is found that the performance of the polishing planes of sapphire with different crystallographic orientations increases in the  $m < c < a < r$  by increasing the volume, surface area and particle size of the most probable slurry and energy dispersion material machined faces.*

**Keywords:** polishing, sludge particles, energy transfer.

1. Филатов Ю. Д., Ветров А. Г., Сидорко В. И. и др. Закономерности финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния // Сверхтв. материалы. – 2013. – № 5. – С. 63–74.
2. Прихна Т. А., Старостина А. В., Лицендорф Д. и др. Исследование стойкости к окислению, механических характеристик материалов на основе МАХ-фаз систем Ti–Al–(C, N) и возможности их использования в качестве инструментальных связок и для полирования // Там же. – 2014. – № 1. – С. 14–26.
3. Филатов Ю. Д., Ветров А. Г., Сидорко В. И. и др. Полирование элементов оптико-электронной техники из монокристаллического карбида кремния // Там же. – 2015. – № 1. – С. 63–71.
4. Филатов А. Ю., Сидорко В. И., Филатов Ю. Д. Особенности формирования макро- и микрорельефа плоских поверхностей деталей из неметаллических материалов при алмазном шлифовании // Там же. – 2007. – № 6. – С. 48–57.
5. Филатов Ю. Д., Сидорко В. И., Филатов А. Ю. и др. Шероховатость поверхностей при финишной алмазно-абразивной обработке // Там же. – 2009. – № 3. – С. 68–74.
6. Filatov Y. D., Sidorko V. I., Filatov O. Yu. et al. Surface quality control in diamond abrasive finishing // Measurement Systems for Industrial Inspection VI, Proc. SPIE. – 2009. – 7389, art. 73892O (9).
7. Filatov O. Yu., Poperenko L. V. In situ ellipsometry of surface layer of nonmetallic transparent materials during its finish processing // Appl. Surf. Sci. – 2006. – 253, N 1. – P. 163–166.
8. Филатов Ю. Д., Яцук В. П., Филатов А. Ю. и др. Оценка шероховатости и отражательной способности поверхностей изделий из неметаллических материалов при финишной алмазно-абразивной обработке // Сверхтв. материалы. – 2009. – № 5. – С. 70–81.
9. Filatov Yu. D., Filatov O. Yu., Heisel U. et al. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method // Optical Micro- and Nanometrology III, Proc. SPIE. – 2010. – 7718, art. 77181J (9).
10. Филатов Ю. Д., Филатов А. Ю., Сирота О. О. и др. Влияние рассеяния частиц износа инструмента в контактной зоне на формирование микропрофиля обработанной поверхности при полировании кварца // Сверхтв. материалы. – 2010. – № 6. – С. 68–77.
11. Филатов А. Ю., Сидорко В. И. Локализация фрагментов налета на обрабатываемой поверхности при полировании неметаллических материалов // Там же. – 2011. – № 5. – С. 73–87.
12. Filatov Yu. D., Monteil G., Sidorko V. I., Filatov O. Yu. Formation of a Deposit on Work-piece Surface in Polishing Nonmetallic Materials // Smart Sensors, Actuators, and MEMS VI. Proc. SPIE. – 2013. – 8763, art. 876336 (15).
13. Zhu H., Tessaroto L. A., Sabia R. et al. Chemical mechanical polishing (CMP) anisotropy in sapphire // Appl. Surf. Sci. – 2004. – 236, N 1–4. – P. 120–130.
14. Budnikov A. T., Vovk E. A., Krivonogov S. I. et al. Anisotropy of sapphire properties associated with chemical-mechanical polishing with silica // Funct. Mater. – 2010. – 17, N 4. – P. 488–494.
15. Wang Y., Liuu S., Peng G. et al. Effects of surface treatment on sapphire substrates // J. Crystal Growth. – 2005. – 274. – P. 241–245.

16. *Филатов Ю. Д.* Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // *Сверхтв. материалы.* – 2001. – № 3. – С. 36–49.
17. *Филатов Ю. Д.* Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком // *Там же.* – 2008. – № 1. – С. 59–66.
18. *Filatov Y. D., Filatov O. Y., Monteil G. et al.* Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // *Opt. Eng.* – 2011. – **50**, N 6, art. 063401.
19. *Filatov Y. D., Filatov O. Yu., Monteil G. et al.* Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // *Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XI; and Advances in Thin Film Coatings VI, Proc. SPIE.* – 2010. – **7786**, art. 778613 (9).
20. *Филатов Ю. Д., Сидорко В. И.* Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // *Сверхтв. материалы.* – 2005. – № 1. – С. 58–66.
21. *Бахолдин С.И., Маслов В.Н.* Моделирование поверхностных энергий кристаллов сапфира // *ФТТ.* – 2015. – **57**, вып. 6. – С. 1213–1219.
22. *Vodenitcharova T., Zhang L. C., Zarudi I. et al.* The effect of anisotropy on the deformation and fracture of sapphire wafers subjected to thermal shocks // *J. Mater. Proc. Tech.* – 2007. – **194**. – P. 52–62.
23. *Добровинская Е. Р., Литвинов Л. А., Пищик В. В.* Энциклопедия сапфира. – Харьков: Ин-т монокристаллов, 2004. – 508 с.
24. *Барыбин А. А., Томилин В. И., Шаповалов В. И.* Физико-технологические основы макро-, микро- и нанoeлектроники. – М.: Физматлит, 2011. – 784 с.
25. *Kadleikova M., Breza J., Vesely M.* Raman spectra of synthetic sapphire // *Microelectronics Journal.* – 2001. – N 32. – P. 955–958.
26. *Файнер Н. И., Косинова М. Л., Румянцев Ю. М.* Тонкие пленки карбонитридов кремния и бора: синтез, исследование состава и структуры // *Рос. хим. журн. о-ва им. Д. И. Менделеева.* – 2001. – **XLV**, № 3. – С. 101–108.
27. *Герасимов С. А., Дмитриева Н. М., Косарева Т. А.* Исследование процесса механической обработки лейкосапфира // *Науч.-техн. журн. Контенант.* – 2013. – **12**, № 2. – С. 84–89.

Поступила 25.05.2015