

Исследование процессов обработки

УДК 621.623

Ю. Д. Филатов

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля
НАН Украины, г. Киев, Украина
filatov@ism.kiev.ua

Алмазное полирование кристаллических материалов для оптоэлектроники

В результате исследований закономерностей механического полирования оптоэлектронных деталей из кристаллических материалов установлено, что производительность полирования убывает при увеличении их энергии связи и энергии переноса, а возрастает при увеличении коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала, пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности притира и силы Лифшица. Показано, что отношение коэффициента объемного износа к коэффициенту температуропроводности обрабатываемого материала зависит от удельной теплоемкости и энергии переноса.

Ключевые слова: полирование, производительность, энергия переноса, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, коэффициент объемного износа.

ВВЕДЕНИЕ

При производстве прецизионных элементов и подложек для оптоэлектроники из сапфира, карбида кремния, нитрида галлия, нитрида алюминия и других кристаллических материалов наиболее сложной является заключительная операция обработки – полирование [1–4]. Известные технологии механического полирования основаны на применении инструмента со связанным абразивом или предполагают использование полировальных суспензий и притиров, на поверхности которых локализуются зерна абразивных порошков. Инструменты со связанным полировальным порошком диоксида церия или алмазным микропорошком на органической или металлической связке используются для механического полирования (МП) оптического стекла, кварца и монокристаллического карбида кремния [5–7]. Однако инструменты со связанным абразивом для МП-элементов и подложек для оптоэлектроники не находят широкого применения из-за невозможности обеспечения стабильного качества обработанных поверхно-

стей. Наиболее часто при производстве элементов оптических систем и электронной техники на операции МП используются полировальные суспензии абразивных порошков. Алмазные микропорошки в суспензиях используются для полирования сапфира, карбида кремния и нитрида галлия [8–10]. Для МП-монокристаллов карбида кремния используются суспензии порошков диоксида церия с размером зерен менее 1 мкм, а также порошков кубического нитрида бора и МАХ-фазы Ti_3AlC_2 [8, 11–13]. При механическом полировании происходит основной съем припуска на обработку и формируется поверхность, параметры шероховатости которой имеют значения от единиц до десятков нанометров.

Повышение производительности полирования прецизионных поверхностей элементов оптоэлектроники из кристаллических материалов при обязательном удовлетворении требований к качеству их обработки может быть достигнуто только на основе изучения механизма съема обрабатываемого материала и формирования микро- и нанорельефа полированной поверхности в процессе полирования.

Целью данного исследования является изучение закономерностей механического полирования плоских поверхностей оптоэлектронных деталей из сапфира, карбида кремния, нитрида галлия и нитрида алюминия при помощи суспензии алмазных микропорошков.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПОЛИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Для изучения закономерностей съема обрабатываемого материала при механическом полировании прецизионных поверхностей элементов оптоэлектроники при помощи полировальных суспензий все более широко используется обобщенная модель, основанная на кластерной модели износа твердых тел при трении и физико-статистической модели образования и удаления с обрабатываемой поверхности частиц шлама [8, 14–16]. Интенсивность съема обрабатываемого материала при механическом полировании пропорциональна длине L_T пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности притира и определяется уравнением $Q = \eta L_T$, в котором коэффициент пропорциональности η (коэффициент объемного износа) характеризует процесс образования и удаления частиц шлама как перенос массы. Коэффициент η объемного износа зависит от размеров $d(i)$ и концентрации $n(i)$ частиц шлама, времени t_k их контакта с поверхностью зерна полировального порошка, площади $S(i)$ поверхности частиц шлама, среднего размера d_a зерен полировального порошка и безразмерного пара-

метра $\theta = \frac{\lambda T L_T}{p_a u S_k}$ (λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала; T – температура в контактной зоне; p_a – номинальное давление прижима детали к притиру; u – скорость их относительного перемещения, S_k – площадь контакта поверхностей притира и детали) и определяется методом компьютерного моделирования [13, 16].

В соответствии с кластерной моделью концентрация частиц шлама (ЧШ) на обрабатываемой поверхности определяется флуктуационными силами взаимодействия (силами Лифшица), возникающими на единице площади контакта обрабатываемой поверхности с поверхностью притира, которые характеризуются зависящими от частоты диэлектрическими проницаемостями [14, 15, 17]:

$$n(i) = \frac{F_L l_0}{\pi \hbar} P(i, \nu), [\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}], \quad (1)$$

где $F_L = \frac{\hbar \bar{\omega}}{8\pi^2 l_0^3}$ – сила Лифшица, Н/м² [24]; $\bar{\omega} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{[\epsilon_1(\omega_{lk}) - \epsilon_3][\epsilon_2(\omega_{lk}) - \epsilon_3]}{[\epsilon_1(\omega_{lk}) + \epsilon_3][\epsilon_2(\omega_{lk}) + \epsilon_3]} d\Omega$

– дисперсионная функция диэлектрических проницаемостей [8, 15, 18]; $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $\omega_{lk} = \frac{3\omega_{01l}\omega_{02k}}{2(\omega_{01l} + \omega_{02k})}$ – характерная

частота; ω_{01l} и ω_{02k} – частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов обрабатываемого материала и полировального порошка; l, k – порядковые номера частот; ω_1 и ω_2 – минимальная и максимальная частоты; ϵ_1 и ϵ_2 – диэлектрические проницаемости обрабатываемого материала и полировального порошка; ϵ_3 – диэлектрическая проницаемость полировальной суспензии; l_0 – толщина зазора между деталью и притиром, заполненного полировальной суспензией. При этом учтено, что распределение частиц шлама по

площадям поверхностей описывается законом $P(i, \nu) = \frac{e^{-\nu} \nu^i}{i!}$ – распределе-

нием Пуассона с параметром $\nu = E_b/E_{cl}$ (E_b – энергия связи обрабатываемого материала; E_{cl} – энергия кластера).

Анализ процесса механического полирования кристаллических материалов при помощи полировальных суспензий осуществляли при следующих допущениях:

- зерна полировального порошка локализованы на поверхности притира либо на уровне максимальной высоты неровностей профиля (активные частицы) либо в микропорах поверхности (неактивные частицы) [19];

- образование частиц шлама является результатом действия сил Лифшица (межмолекулярного взаимодействия между обрабатываемой поверхностью и поверхностью притира);

- частицы шлама образуются в случае превышения энергии кластера над энергией связи обрабатываемого материала ($E_{cl} \geq E_b$ [15]);

- толщина слоя полировальной суспензии между притиром и деталью определяется размером зерен полировального порошка, практически не зависит от реологических характеристик суспензии и удовлетворяет условию $l_0 \ll \lambda_0$ [18] (λ_0 – длина волны, при которой наблюдается существенное поглощение).

Механическое полирование плоских поверхностей оптико-электронных элементов осуществляли по традиционной технологии. Пластины из монокристаллического карбида кремния SiC (площадь обрабатываемой поверхности $S_n = 10,2 \text{ см}^2$), нитрида галлия GaN ($S_n = 8,1 \text{ см}^2$), нитрида алюминия AlN ($S_n = 26,0 \text{ см}^2$) и сапфира Al₂O₃ ($S_n = 16,8 \text{ см}^2$), дискретно закрепленные на блоке диаметром 60 мм, полировали суспензией алмазных микропорошков АСМ 2/1 на притире диаметром 100 мм при усилии прижима 50,5 Н, частоте вращения 90 об/мин, смещении штриха 30 мм, длине штриха 50 мм и средней температуре в зоне контакта 300 К.

Основные физические свойства карбида кремния, нитрида галлия, нитрида алюминия и сапфира приведены в табл. 1. [8, 13, 17, 20–24]. Учитывали также следующие физические характеристики алмазного порошка: частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов ω_{02} (1135 и 1332 см⁻¹) и статическую диэлектрическую проницаемость алмаза (2,5) [8].

Таблица 1. Физические свойства обрабатываемых материалов

Параметр	Материал			
	SiC	GaN	AlN	Al ₂ O ₃
Плотность ρ , г/см ³	3,21	6,15	3,26	3,97
Энергия связи E_b , эВ	3,2	5,4	6,2	6,3
Статическая диэлектрическая проницаемость ϵ_1	6,5	9,5	8,5	11,5
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	490,0	130,0	200,0	32,5
Удельная теплоемкость c_p , Дж/(кг·К)	690,0	491,0	748,0	750,0
Коэффициент температуро- проводности $\chi \cdot 10^5$, м ² /с	22,1	4,3	8,2	1,1
Частота собственных колебаний ω_{01} , см ⁻¹	794,0	144,0	248,6	573,0
	1000,0	531,8	611,0	642,0
		558,8	657,4	748,0
		567,6	670,8	
		734,0	890,0	
		741,0	912,0	

При полировании плоскости c [0001] кристаллических материалов с гексагональной структурой (SiC, GaN, AlN и Al₂O₃) число молекулярных фрагментов в частице шлама – ξ , а площадь ее поверхности $S(i) = S_0(i + 1)$ ($i = \overline{1, N}$, N – число выборок, S_0 – минимальная площадь поверхности) [8, 13, 17]. В табл. 2 приведены расчетные значения дисперсионной функции диэлектрических проницаемостей $\bar{\omega}$, которая характеризует силы F_L взаимодействия (силы Лифшица), действующие на единице площади контакта обрабатываемой поверхности кристаллического материала с поверхностью притира, а также безразмерного параметра θ . Данные расчета и экспериментального определения производительности механического полирования и шероховатости полированных поверхностей пластин из кристаллических материалов SiC, GaN, AlN и Al₂O₃ получены в соответствии с методами, описанными в [8, 13, 17, 24–27].

В результате анализа данных, приведенных в табл. 1, 2, установлены закономерности механического полирования кристаллических материалов. На рис. 1 в полулогарифмическом масштабе представлена зависимость производительности полирования исследуемых материалов от их энергии связи, аппроксимированная линейно убывающей функцией $\ln Q = -k_1 E_b + b_1$ ($k_1 = 0,26 \text{ эВ}^{-1}$, $b_1 = -25,3$ – коэффициенты, определенные методом наименьших квадратов; погрешность аппроксимации – 1%), которая подтверждает активационный характер процесса удаления обрабатываемого материала и экспоненциальную зависимость производительности полирования от энергии связи обрабатываемого материала в соответствии с кластерной моделью [14, 15].

Зависимость интенсивности съема обрабатываемого материала при полировании исследуемых материалов от их коэффициента теплопроводности λ может быть аппроксимирована линейно возрастающей функцией $Q = k_2 \lambda + b_2$ ($k_2 = 5,3 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}^{-1} \cdot \text{К} \cdot \text{м}^4$, $b_2 = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ – коэффициенты, определенные

методом наименьших квадратов; погрешность аппроксимации 10 %). На рис. 2 представлена более общая зависимость, показывающая изменение интенсивности съема обрабатываемого материала при механическом полировании как функцию безразмерного параметра θ . Эта зависимость тоже может быть аппроксимирована линейно возрастающей функцией вида $Q = k_3\theta + b_3$ ($k_3 = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$, $b_3 = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ – коэффициенты, определенные при помощи метода наименьших квадратов; погрешность аппроксимации 10 %).

Таблица 2. Результаты расчета производительности полирования кристаллических материалов

Параметры взаимодействия с полировальным порошком АСМ 2/1	Обрабатываемый материал			
	SiC	GaN	AlN	Al ₂ O ₃
Дисперсионная функция $\bar{\omega} \cdot 10^{-13}, \text{ с}^{-1}$	1,9	2,5	1,4	1,5
Сила Лифшица $F_L, \text{ мкПа}$	5,2	3,4	3,3	3,0
Параметр θ	1939,0	572,0	881,0	143,0
Число молекулярных фрагментов ξ	27,0	62,0	57,0	73,0
Коэффициент объемного износа $\eta \cdot 10^{11}, \text{ м}^2/\text{с}$	2,5	2,6	1,3	1,1
Энергия переноса $W \cdot 10^{-11}, \text{ Дж/кг}$	18,5	2,4	15,0	2,2
Производительность полирования Q :				
расчет, $10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ (мкм/ч)	4,2 (14,8)	2,7 (12,0)	2,3 (3,2)	1,6 (3,4)
эксперимент, мг/мин (мкм/ч)	0,8 (15,5)	1,0 (12,4)	0,4 (3,0)	0,4 (3,9)
Погрешность расчета, %	4,0	7,0	3,0	11,0

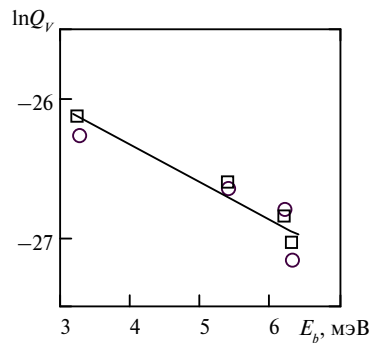


Рис. 1. Зависимость производительности полирования кристаллических материалов от энергии связи: расчет (○), эксперимент (□), аппроксимация (—).

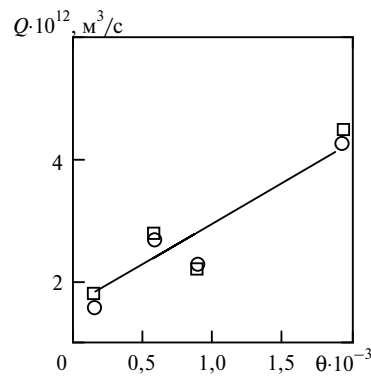


Рис. 2. Зависимость производительности полирования кристаллических материалов от параметра θ : расчет (○), эксперимент (□), аппроксимация (—).

Полученная зависимость показывает, что производительность механического полирования исследуемых материалов зависит от теплофизических характеристик обрабатываемого материала, конструктивных параметров об-

рабатываемых деталей, режимных и кинематических параметров процесса обработки, которые выражаются через безразмерный параметр θ , в полном соответствии с физико-статистической моделью образования и удаления частиц шлама с обрабатываемой поверхности [16, 17, 27].

Показано также, что интенсивность съема материала с обрабатываемой поверхности при механическом полировании существенно зависит от энергии взаимодействия между кластерами на зернах полировального порошка и на обрабатываемой поверхности, которая характеризуется силами Лифшица [18], действующими на единичной площади контакта взаимодействующих поверхностей. Эти силы выражаются через константу Лифшица A_L в соответствии с формулой $F_L = \frac{A_L}{8\pi^2 l_0^3}$ (где l_0 – расстояние между поверхностями обрабатываемой детали и притира) [13, 17]. Приведенная на рис. 3 зависимость

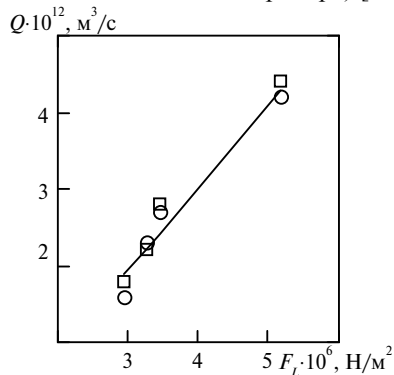


Рис. 3. Зависимость производительности полирования кристаллических материалов от силы Лифшица: расчет (○), эксперимент (□), аппроксимация (—).

производительности алмазного полирования кристаллов карбида кремния, нитрида галлия, нитрида алюминия и сапфира от силы Лифшица аппроксимирована линейной функцией вида $Q = k_4 F_L + b_4$ ($k_4 = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ Вт} \cdot \text{м}^6$, $b_4 = -1,3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ – коэффициенты, определенные при помощи метода наименьших квадратов; погрешность аппроксимации – 3%). Исходя из приведенной формулы, можно оценить минимальное (пороговое) значение силы Лифшица, при которой происходит съем обрабатываемого материала в процессе полирования: $F_L^I = -(b_4/k_4) \approx 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Н/м}^2$.

Кроме того, показано, что производительность полирования кристаллических материалов зависит от энергии переноса W (см. табл. 2), которая характеризует энергетические затраты на удаление с обрабатываемой поверхности единицы массы обрабатываемого материала [16]. На рис. 4 приведена зависимость производительности полирования кристаллических материалов от приведенной энергии переноса $W_0 = (\lambda_{K8}/\lambda)W$, которая характеризует участие частиц шлама в передаче тепловой энергии при механическом полировании сапфира, карбида кремния, нитридов галлия и алюминия по отношению к процессу полирования эталонного материала (оптического стекла марки К8, теплопроводность которого $\lambda_{K8} = 0,95 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ [8, 17, 24]. Полученная зависимость в полупологарифмическом масштабе представляется линейно убывающей функцией $\lg Q = -k_5 \lg W_0 + b_5$ ($k_5 = 0,3$, $b_5 = -8,7$ – коэффициенты, определенные при помощи метода наименьших квадратов; погрешность аппроксимации – 1%), которая позволяет оценивать эффективность механического полирования кристаллических материалов, используя энергию переноса в качестве критерия [8].

Анализ закономерностей процесса полирования неметаллических материалов как явления переноса, осуществленный на основе физико-статистической модели образования и удаления с обрабатываемой поверхности частиц шлама [16], позволил получить уравнение, связывающее коэффициент объемного износа η с коэффициентом теплопроводности λ , температу-

рой в зоне контакта детали и притира и энергией переноса: $\eta = \lambda T / (\rho W)$. Это уравнение показывает, что коэффициент η объемного износа (а значит и интенсивность съема обрабатываемого материала при механическом полировании) обратно пропорционален энергии переноса W , что подтверждается данными, приведенными на рис. 4. Кроме того, приведенное уравнение показывает, что между коэффициентом η объемного износа и коэффициентом теплопроводности λ существует связь, которая тоже подтверждается линейной зависимостью производительности полирования от коэффициента теплопроводности.

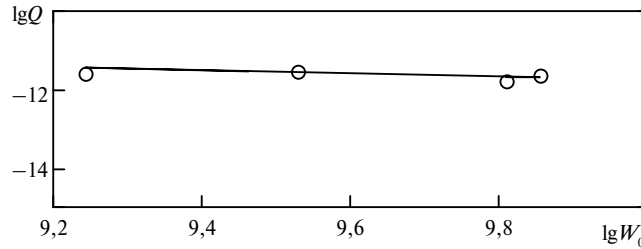


Рис. 4. Зависимость производительности полирования кристаллических материалов от приведенной энергии переноса.

Анализ известных соотношений, связывающих коэффициенты переноса: температуропроводность, коэффициент диффузии и кинематическую вязкость, размерность которых такая же, как и коэффициента объемного износа $-\text{[м}^2/\text{с]}$, показал, что отношение коэффициента объемного износа η к коэффициенту температуропроводности $\chi = \lambda / (\rho c_p)$ (c_p – удельная теплоемкость; ρ – плотность обрабатываемого материала) зависит от энергии переноса W и выражается уравнением

$$\frac{\eta}{\chi} = \frac{c_p T}{W}. \quad (2)$$

Воспользовавшись выражением для приведенной энергии переноса W_0 , уравнение (2) можно преобразовать к следующему виду: $\frac{W_0}{c_p T} = \left(\frac{\lambda_{к8}}{\lambda} \right) \left(\frac{\chi}{\eta} \right)$,

а зависимость функции $\psi = c_p T (\lambda_{к8} / \lambda) (\chi / \eta)$ от приведенной энергии переноса аппроксимировать линейной функцией $\psi = k_6 W_0 + b_6 \approx W_0$ ($k_6 = 0,96 \approx 1$, $b_6 = 1,2 \cdot 10^8$ Дж/кг – коэффициенты, определенные методом наименьших квадратов; погрешность аппроксимации 3%). Полученное равенство $\psi = W_0$ позволяет сделать вывод о справедливости равенства (2), определяющего отношение коэффициентов объемного износа и температуропроводности в зависимости от удельной теплоемкости и энергии переноса обрабатываемого материала, а также температуры в зоне контакта детали и притира.

На рис. 5 приведена диаграмма, на которой в логарифмическом масштабе представлены значения приведенной энергии переноса, характерные для процесса механического полирования кристаллов карбида кремния, нитрида галлия, нитрида алюминия и сапфира, а также горизонтальные линии $\lg W_0 = 9$ и $\lg W_0 = 10$, характерные соответственно для процессов супертонкого шлифования и полирования прецизионных оптических поверхностей [8, 17, 24].

По значению приведенной энергии переноса (см. рис. 5) можно заключить, что при воздействии суспензии алмазного микропорошка АСМ 2/1 на

обрабатываемую поверхность рассматриваемых кристаллических материалов по традиционной технологии съема обрабатываемого материала происходит в соответствии с классическим процессом полирования ($9 < \lg W_0 < 10$). Относительная производительность съема обрабатываемого материала при механическом полировании кристаллов карбида кремния, нитрида галлия и нитрида алюминия $q = Q/Q_0$ (Q_0 – производительность полирования сапфира) характеризуется соотношением $q_{\text{SiC}}:q_{\text{GaN}}:q_{\text{AlN}}:q_{\text{sapphire}} = 2,6:1,7:1,4:1,0$ (экспериментальные данные – 2,4:1,6:1,2:1,0 соответственно, среднее отклонение данных расчета от эксперимента – 8 %).

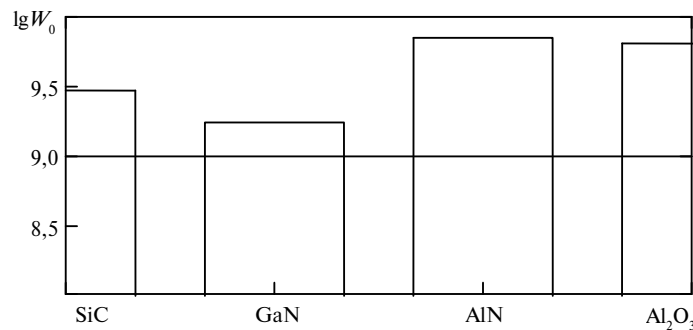


Рис. 5. Приведенная энергия переноса кристаллических материалов при механическом полировании.

ВЫВОДЫ

В результате теоретических и экспериментальных исследований закономерностей механического полирования плоских поверхностей оптоэлектронных деталей из кристаллических материалов суспензией алмазных микропорошков установлено, что производительность полирования кристаллов карбида кремния, нитрида галлия, нитрида алюминия и сапфира экспоненциально убывает при увеличении их энергии связи.

Интенсивность съема обрабатываемого материала при механическом полировании исследуемых материалов пропорциональна безразмерному параметру θ , который зависит от длины пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности притира, коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала, температуры в контактной зоне, номинального давления прижима, скорости их относительного перемещения и площади их контакта.

Энергия взаимодействия кластеров на зернах полировального порошка и на обрабатываемой поверхности определяет интенсивность съема обрабатываемого материала, а производительность полирования кристаллических материалов пропорциональна силе Лифшица, действующей на единичной площади контакта взаимодействующих поверхностей детали и притира.

Зависимость производительности полирования кристаллических материалов от приведенной энергии переноса является линейно убывающей функцией, что позволяет использовать энергию переноса в качестве критерия эффективности механического полирования.

Изучение связи процессов износа обрабатываемой поверхности при механическом полировании и распространения тепловой энергии позволило определить соотношение коэффициентов объемного износа и температуропроводности обрабатываемого материала, которое зависит от удельной теплоем-

кости, энергии переноса обрабатываемого материала и температуры в зоне контакта детали и притира, а также установит, что при механическом полировании кристаллических материалов при помощи суспензии алмазного микророзночка АСМ 2/1 относительная производительность съема обрабатываемого материала убывает в ряду SiC, GaN, AlN, Al₂O₃ и характеризуется соотношением 2,6:1,7:1,4:1,0.

У результаті дослідження закономірностей механічного полірування оптоелектронних деталей з кристалічних матеріалів встановлено, що продуктивність полірування зменшується при збільшенні їх енергії зв'язку та енергії переносу, а зростає при збільшенні коефіцієнта теплопровідності оброблюваного матеріалу, шляху тертя елемента оброблюваної поверхні по поверхні притира і сили Ліфшиця. Показано, що відношення коефіцієнта об'ємного зносу до коефіцієнта температуропровідності оброблюваного матеріалу залежить від питомої теплоємності та енергії переносу.

Ключові слова: полірування, частинка шлама, енергія переносу, коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність, коефіцієнт об'ємного зносу.

As a result, studies of regularities mechanical polishing optoelectronic components of crystalline materials found that polishing efficiency decreases with an increase of the binding energy and the transfer energy, but increases with increasing heat conduction coefficient of the material being processed, a processed surface road friction element by lapping and Lifshitz force. It is shown that the ratio of the volume wear coefficient to the temperature conductivity coefficient of the material being processed depends on the specific heat and the transfer energy.

Keywords: polishing, sludge particles, energy transfer, coefficient of thermal conductivity, specific heat, coefficient of volumetric wear.

1. Wang Y., Liu S., Peng G. et al. Effects of surface treatment on sapphire substrates // J. Crystal Growth. – 2005. – **274**. – P. 241–245.
2. Chen X. F., Siche D., Albrecht M. et al. Surface preparation of AlN substrates // Crystal Res. Technol. – 2008. – **43**, N 6. – P. 651–655.
3. Vovk E. A., Budnikov A. T., Nizhankovskiy S. V. et al. Polishing of AlN/sapphire substrate obtained by thermochemical nitridation of sapphire // Funct. Mater. – 2013. – **20**, N 2. – P. 253–258.
4. Satoh I., Arakawa S., Tanizaki K. et al. Development of aluminum nitride single-crystal substrates // SEI Techn. Rev. – 2010. – N. 71. – P. 78–82.
5. Filatov Y. D., Filatov O. Yu., Monteil G. et al. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // Proc. SPIE. – 2010. – **7786**, art. 778613.
6. Yaguo Li, Yongbo Wu, Jian Wang. et al. Tentative investigation towards precision polishing of optical components with ultrasonically vibrating bound-abrasive pellets // Opt. Express. – 2012. – **20**, N 1. – P. 568–258.
7. Ling Y. Low-damage grinding // Polishing of Silicon Carbide Surfaces: SIMTech Technical Report (PT/01/001/PM).
8. Філатов Ю. Д., Ветров А. Г., Сидорко В. И. и др. Полирование элементов оптико-электронной техники из монокристаллического карбида кремния // Сверхтв. материалы. – 2015. – № 1. – С. 63–71.
9. Aida H., Takeda H., Kim S.-W. et al. Evaluation of subsurface damage in GaN substrate induced by mechanical polishing with diamond abrasives // Appl. Surf. Sci. – 2014. – **292**. – P. 531–536.
10. Nowak G., Xia X. H., Kelly J. J. et al. Electrochemical etching of highly conductive GaN single crystals // J. Cryst. Growth. – 2001. – **222**. – P. 735–740.
11. Golabczak M. Polishing of hard machining semiconductor materials made of silicon carbide // Mech. Mechanical Eng. – 2011. – **15**, N 1. – P. 81–93.
12. Hui Deng, Kenji Hosoya, Yusuke Imanishi. et al. Electro-chemical mechanical polishing of single-crystal SiC using CeO₂ slurry // Electrochem. Commun. – 2015. – **52**. – P. 5–8.
13. Filatov O. Yu., Sidorko V. I., Kovalev S. V. et al. Polishing substrates of single crystal silicon carbide and sapphire for optoelectronics // Funct. Mater. – 2016. – **23**, N 1. – P. 104–110.

14. *Филатов Ю. Д.* Полирование алмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы. – 2001. – № 3. – С. 36–49.
15. *Филатов Ю. Д., Рогов В. В.* Кластерная модель механизма усталостного износа SiO₂-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия. Часть 1 // Там же. – 1994. – № 3. – С. 40–43.
16. *Филатов Ю. Д., Сидорко В. И.* Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Там же. – 2005. – № 1. – С. 58–66.
17. *Филатов А. Ю., Сидорко В. И., Ковалев С. В. и др.* Производительность полирования анизотропных монокристаллических материалов для оптоэлектроники // Там же. – 2016. – № 2. – С. 65–76.
18. *Кац Е. И.* Силы Ван-дер-Ваальса, Казимира и Лифшица в мягкой материи // Успехи физических наук. – 2015. – **185**, № 9. – С. 964–969.
19. *Lee H. S., Jeong H. D., Dornfeld D. A.* Semi-empirical material removal rate distribution model for SiO₂ chemical mechanical polishing (CMP) processes // *Precis. Eng.* – 2013. – **37**. – P. 483–490.
20. *Harima H.* Properties of GaN and related compounds studied by means of Raman scattering // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2002. – **14**. – P. 967–993.
21. *Davydov V. Yu., Kitaev Yu. E., Goncharuk I. N. et al.* Phonon dispersion and Raman scattering in hexagonal GaN and AlN // *Phys. Rev. B.* – 1998. – **58**, N 19. – P. 12899–12907.
22. *Күэй Р.* Электроника на основе нитрида галлия. – М.: Техносфера. – 2011. – 592 с.
23. *Asgar K., Qasim M., Das D.* Effect of polishing parameters on chemical mechanical planarization of C-plane (0001) gallium nitride surface using SiO₂ and Al₂O₃ abrasives // *ECS J. Solid State Sci. Technol.* – 2014. – **3**, N 8. – P. 277–284.
24. *Филатов Ю. Д., Ветров А. Г., Сидорко В. И. и др.* Закономерности финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния // Сверхтв. материалы. – 2013. – № 5. – С. 63–71.
25. *Филатов Ю. Д.* Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла // Там же. – 1991. – № 5. – С. 61–65.
26. *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 // Там же. – 2009. – № 5. – С. 70–81.
27. *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.

Поступила 10.08.2016