

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

Шероховатость поверхностей оптоэлектронных элементов при механическом полировании

В результате исследований закономерностей механического полирования оптоэлектронных элементов из кристаллических материалов установлено, что параметры шероховатости обработанных поверхностей линейно возрастают при увеличении наиболее вероятных значений размеров и площади поверхности частиц шлама, объема элементарной ячейки и площади обрабатываемой грани кристалла. Показана обратно пропорциональная зависимость параметров шероховатости от энергии, которая затрачивается на образование частиц шлама. Относительная шероховатость обработанных поверхностей кристаллов карбида кремния, нитрида галлия, нитрида алюминия и сапфира характеризуется соотношением 0,68:0,67:0,63:1,00.

Ключевые слова: полирование, частица шлама, шероховатость.

ВВЕДЕНИЕ

Прецизионную обработку элементов для оптоэлектроники из оптических и полупроводниковых кристаллов (сапфир, карбид кремния, нитрид галлия, нитрид алюминия и др.) осуществляют в зависимости от требований к шероховатости обработанных поверхностей в один или два перехода на операциях механического полирования (МП) и химико-механического полирования (ХМП) [1–8]. Механическое полирование оптоэлектронных элементов можно производить при помощи полировальных порошков как в связанном, так и в свободном состоянии. Для механического полирования оптического стекла, кварца и монокристаллического карбида кремния используют инструменты на органической или металлической связке из полировальных порошков диоксида церия или алмазных микропорошков [9–11]. Такие инструменты со связанными полировальными порошками при МП элементов и подложек для оптоэлектроники не позволяют стабильно обеспечивать требуемую шероховатость обработанных поверхностей. В основном

при МП элементов оптических систем и электронной техники используют полировальные суспензии и притиры из мягких материалов, на поверхности которых локализуются зерна полировальных порошков. Для полирования сапфира, карбида кремния и нитрида галлия в полировальных суспензиях используют алмазные микропорошки [1, 5, 7, 8, 12, 13]. Для механического полирования карбида кремния используют суспензии порошков диоксида церия с размером зерен менее 1 мкм, а также порошков кубического нитрида бора и МАХ-фазы Ti_3AlC_2 [5, 6, 14, 15]. При механическом полировании происходит съём обрабатываемого материала и формируется поверхность, значение среднеквадратичного отклонения профиля которой лежит в диапазоне от единиц до десятков нанометров. Окончательная обработка элементов и подложек для оптики и микроэлектроники из сапфира, карбида кремния, нитрида алюминия, композитных подложек AlN/сапфир и др. происходит при ХМП, когда интенсивность съема обрабатываемого материала в десятки, а то и в сотни раз меньше, чем при МП, а среднеквадратичное отклонение профиля $Rq \leq 1$ нм и осуществляется преимущественно при помощи коллоидных систем на основе кремнезема [1, 2, 16–19].

Повышение качества полированных поверхностей элементов оптоэлектронной техники из кристаллических материалов может быть достигнуто только на основе изучения механизма образования частиц шлама и формирования нанорельефа полированной поверхности в процессах МП и ХМП. Целью исследования является изучение закономерностей формирования нанорельефа обработанных поверхностей элементов и подложек из сапфира, карбида кремния, нитрида галлия и нитрида алюминия при помощи суспензии алмазных микропорошков.

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ПОЛИРОВАНИИ

При исследовании закономерностей механического полирования поверхностей элементов и подложек оптоэлектронной техники при помощи полировальных суспензий используются кластерная модель съема материала при полировании и физико-статистическая модель образования и удаления с обрабатываемой поверхности частиц шлама [5, 8, 20–22]. Механическое полирование представляет собой явление переноса, при котором вследствие образования и удаления с обрабатываемой поверхности частиц шлама происходит и съём материала, и формирование ее шероховатости. Производительность съема обрабатываемого материала определяется коэффициентом объемного износа [6, 8, 22, 23], а параметры шероховатости обработанной поверхности зависят от размеров частиц шлама, удаляемых из нее в процессе полирования [5, 24–27].

Закономерности формирования нанопрофиля поверхностей оптоэлектронных элементов из кристаллических материалов при воздействии на них полировальной суспензии исследовали при допущениях, что зерна полировального порошка локализуются на поверхности притира либо на уровне максимальной высоты неровностей профиля, либо в микропорах поверхности [28], а частицы шлама образуются вследствие межмолекулярного взаимодействия между обрабатываемой поверхностью и поверхностью притира. Частица шлама состоит из $\xi = k_1 k_2 k_3$ молекулярных фрагментов и имеет вид параллелепипеда, длина сторон которого определяется числами k_1, k_2, k_3 , а размер i -ой частицы – формулой $d(i) = [S_0(i+1)/\pi]^{1/2}$ (S_0 – минимальная площадь поверхности) [20]. Высота неровностей профиля обрабатываемой поверхности

определяется размерами $d(i)$ частиц шлама или высотой соответствующих им параллелепипедов $h(i)$, а базовая длина для определения шероховатости определяется длинами проекций частиц шлама на обрабатываемую плоскость $l(i)$. Параметры шероховатости поверхности Ra , Rq и $Rmax$ определяли расчетным путем по модельным профилограммам, полученным при помощи компьютерного моделирования [5, 24].

Изучали нанопрофиль обработанных поверхностей при механическом полировании монокристаллического карбида кремния (SiC, плотность – 3,21 г/см³, энергия связи – 3,2 эВ, коэффициент теплопроводности – 490 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 6,5, постоянные решетки $a = 0,3073$ нм, $c = 1,5110$ нм, частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов – 794,0, 1000,0 [4–6, 14]), нитрида галлия (GaN, плотность – 6,15 г/см³, энергия связи – 5,4 эВ, коэффициент теплопроводности – 130 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 9,5, постоянные решетки $a = 0,3189$ нм, $c = 0,5185$ нм, частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов – 144,0, 531,8, 558,8, 567,6, 734,0 и 741,0 см⁻¹ [7, 8, 29–31]), нитрида алюминия (AlN, плотность – 3,26 г/см³, энергия связи – 6,2 эВ, коэффициент теплопроводности – 200 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 8,5, постоянные решетки $a = 0,3112$ нм, $c = 0,4982$ нм, частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов – 248,6, 611,0, 657,4, 670,8, 890,0 и 912,0 см⁻¹ [8, 30]) и сапфира (Al₂O₃, плотность – 3,97 г/см³, энергия связи – 6,3 эВ, коэффициент теплопроводности – 32,5 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 11,5, постоянные решетки $a = 0,4758$ нм, $c = 1,2991$ нм, частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов – 573,0, 642,0, 748,0 [6, 8, 23, 24, 32]).

При полировании плоскости C [0001] кристаллических материалов SiC, GaN, AlN и Al₂O₃ с гексагональной структурой с межплоскостными расстояниями $L_x = 1,5a$, $L_y = a\sqrt{3}$ и $L_z = c/6$ размеры частиц шлама определяются в соответствии с формулами: $l_x = k_1L_x$, $l_y = k_2L_y$, $l_z = k_3L_z$. Поскольку площадь поверхности частиц шлама $S_i = S_0(i + 1)$, $i = 1, N$, N – число выборок [5, 6, 8, 23, 24], их размеры можно характеризовать наиболее вероятным размером $a_v = \sum_i d(i)P(i, v)$, высотой параллелепипедов $h(i) \approx h_0(i + 1)^{1/2}$ и ее наиболее вероятным значением $h_v = \sum_i h(i)P(i, v)$, а также длиной проекций частиц на обрабатываемую плоскость $l(i) \approx [(l_x^2 + l_y^2)(i+1)]^{1/2}$ и их наиболее вероятным значением $l_v = \sum_i l(i)P(i, v)$. Расчетные значения числа молекулярных фрагментов ξ , размеров элементарной ячейки, наиболее вероятных значений размеров частиц шлама приведены в таблице.

Результаты расчета шероховатости поверхностей пластин

Параметр	Обрабатываемый материал			
	SiC	GaN	AlN	Al ₂ O ₃
Число молекулярных фрагментов в частице шлама	27	62	57	73
$\xi = k_1k_2k_3$	$k_1 = 4$	$k_1 = 4$	$k_1 = 3-4$	$k_1 = 4$
	$k_2 = 2$	$k_2 = 1-2$	$k_2 = 1-2$	$k_2 = 3$
	$k_3 = 3-4$	$k_3 = 10$	$k_3 = 10$	$k_3 = 6$

(Продолжение)

Размер элементарной ячейки, Å	$L_x = 4,610$ $L_y = 5,323$ $L_z = 2,518$	$L_x = 4,784$ $L_y = 5,524$ $L_z = 0,864$	$L_x = 4,668$ $L_y = 5,390$ $L_z = 0,830$	$L_x = 7,137$ $L_y = 8,241$ $L_z = 2,165$
Площадь грани, Å ²	24,5	26,4	25,2	58,8
Объем ячейки V_0 , Å ³	62	23	21	127
Наиболее вероятный размер частицы шлама a_v , нм	2,5	2,4	2,3	4,5
Высота частицы h_v , нм	2,40	2,37	2,27	3,56
Проекция частицы на обрабатываемую плоскость l_v , нм	2,90	2,86	2,49	5,18
Площадь поверхности частицы шлама S , нм ²	21,6	19,3	17,3	68,6
Константа Лифшица A_L , 10^{-21} Дж (мэВ)	2,0 (13)	2,7 (17)	1,5 (9)	1,6 (10)
Плотность колебательной энергии γ , мкДж/м ²	93	140	87	23
Шероховатость полированной поверхности				
Ra , нм	8,1±0,2	7,9±0,4	7,5±0,2	12,0±0,4
Rq , нм	8,7±0,3	8,4±0,4	8,0±0,1	12,8±0,4
$Rmax$, нм	14,6±1,8	13,9±1,1	13,1±0,4	19,6±2,1

В результате анализа данных, приведенных в таблице, установлены следующие закономерности формирования нанорельефа обработанной поверхности элементов из кристаллических материалов при механическом полировании. На рис. 1 представлены зависимости параметров шероховатости Ra , Rq и $Rmax$ от наиболее вероятного размера частиц шлама a_v . Эти зависимости могут быть аппроксимированы линейными функциями:

$$\begin{pmatrix} Ra \\ Rq \\ Rmax \end{pmatrix} = \alpha_1 a_v + \beta_1,$$

где $\alpha_1 = \begin{pmatrix} 2,0 \\ 2,1 \\ 2,8 \end{pmatrix}$, $\beta_1 = \begin{pmatrix} 3,2 \\ 3,3 \\ 7,3 \end{pmatrix}$ нм – коэффициенты, определенные при помощи

метода наименьших квадратов; погрешность аппроксимации – не более 2%. Из этого следует, что, чем меньше частицы шлама, удаляемые с обрабатываемой поверхности элементов из кристаллических материалов SiC, GaN, AlN и Al₂O₃, тем меньше их высотные параметры шероховатости. Поверхности элементов из указанных материалов после механического полирования характеризуются минимальными параметрами шероховатости: $Ra \approx 3,2$ нм, $Rq \approx 3,3$ нм и $Rmax \approx 7,3$ нм. Линейная зависимость параметров шероховатости от наиболее вероятного размера частиц шлама является основополагающей

шей для процессов механического полирования и находится в полном соответствии с результатами, полученными для полирования монокристаллического карбида кремния суспензиями из алмазных микропорошков, порошков кубического нитрида бора и порошков МАХ-фазы Ti_3AlC_2 с различным зерновым составом [4, 5].

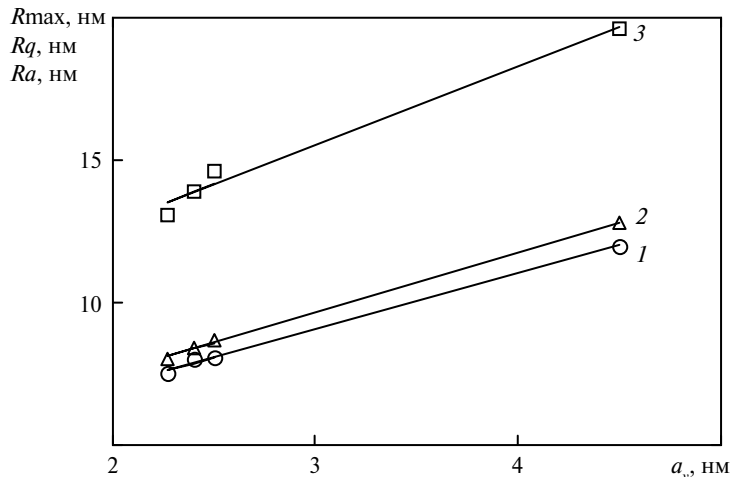


Рис. 1. Зависимости параметров шероховатости Ra (1), Rq (2), R_{max} (3) от наиболее вероятного размера частиц шлама.

На рис. 2 представлены зависимости параметров шероховатости Ra , Rq и R_{max} от наиболее вероятной высоты частиц шлама h_v . Эти зависимости также аппроксимированы линейными функциями:

$$\begin{pmatrix} Ra \\ Rq \end{pmatrix} = \alpha_2 h_v \text{ и } R_{max} = \alpha_{2m} h_v + \beta_2,$$

где $\alpha_2 = \begin{pmatrix} 2,3 \\ 2,5 \end{pmatrix}$, $\alpha_{2m} = 3,2$, $\beta_2 = 2,6$ нм – коэффициенты, определенные при помощи метода наименьших квадратов; погрешность аппроксимации – не более 2 %.

Линейная зависимость параметров шероховатости от наиболее вероятной высоты частиц шлама согласуется с результатами, полученными для полирования плоскостей сапфира с различной кристаллографической ориентацией [24], когда высота неровностей профиля обрабатываемой поверхности определяется не размерами частиц шлама, а высотой соответствующих им параллелепипедов, которая перпендикулярна обрабатываемой плоскости и зависит от межплоскостных расстояний кристалла. Незначительные отличия в результатах компьютерного моделирования нанопрофиля полированных поверхностей кристаллических материалов с одинаковой (в данном случае гексагональной) структурой по одной и той же плоскости (в данном случае [0001]), полученных на основе расчетов по наиболее вероятному размеру a_v [5] и наиболее вероятной высоте частиц шлама h_v [24], показали, что при анализе шероховатости поверхностей с различной кристаллографической ориентацией можно пользоваться распределением Пуассона частиц шлама по высоте.

Также наблюдали линейные зависимости параметров шероховатости Ra , Rq и R_{max} от площади обрабатываемой грани кристалла, объема элементар-

ной ячейки и площади поверхности частиц шлама (см. таблицу), которые наряду с приведенными на рис. 1 и 2 функциями подтверждают правомочность результатов компьютерного моделирования нанопрофиля полированных поверхностей.

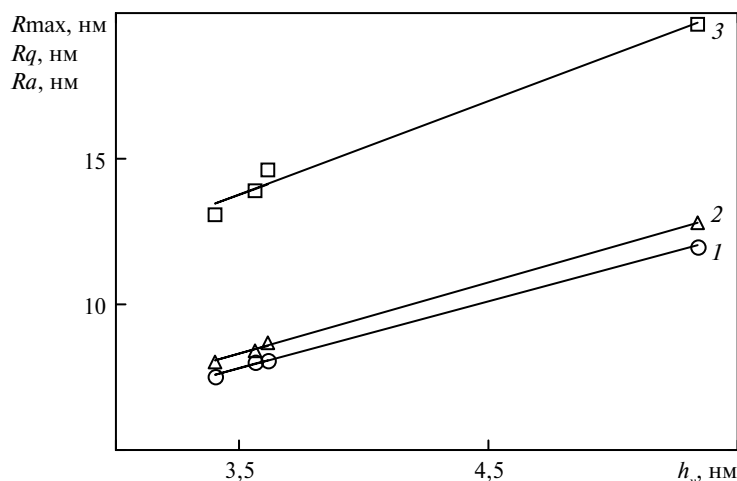


Рис. 2. Зависимости параметров шероховатости Ra (1), Rq (2), R_{max} (3) от наиболее вероятной высоты частиц шлама.

Нанорельеф поверхности при механическом полировании формируется вследствие удаления из нее частиц износа, наиболее вероятный размер которых существенно зависит от энергии межмолекулярного взаимодействия между кластерами на поверхностях зерен полировального порошка и элемента обрабатываемой поверхности, характеризуемой константой Лифшица A_L [6, 23, 24] (см. таблицу). При исследовании влияния плотности колебательной энергии $\gamma = A_L/S$ [Дж/м²], показывающей затраты энергии на образование одной частицы шлама с площадью поверхности S , установлено, что наиболее вероятный размер частиц шлама обратно пропорционален этой величине [5]. На рис. 3 приведены зависимости параметров шероховатости Ra , Rq и R_{max} от энергии, затрачиваемой на образование частиц износа γ .

Эти зависимости могут быть аппроксимированы линейными функциями (см. рис. 3):

$$\begin{pmatrix} Ra \\ Rq \\ R_{max} \end{pmatrix} = \alpha_3 \gamma^{-1} + \beta_3,$$

где $\alpha_3 = \begin{pmatrix} 1,2 \\ 1,3 \\ 1,7 \end{pmatrix} \cdot 10^{-13}$ Дж/м, $\beta_3 = \begin{pmatrix} 6,7 \\ 7,1 \\ 12,3 \end{pmatrix}$ нм – коэффициенты, определенные при

помощи метода наименьших квадратов; погрешность аппроксимации – 3–4 %. Гиперболическое уменьшение параметров шероховатости Ra , Rq и R_{max} при увеличении плотности колебательной энергии γ свидетельствует о том, что механическое полирование поверхностей элементов, обеспечивающее минимальную шероховатость, необходимо осуществлять при помощи таких полировальных порошков, которые для конкретного обрабатываемого мате-

риала обеспечивают максимальное значение константы Лифшица, т. е. наибольшую энергию межмолекулярного взаимодействия между ними.

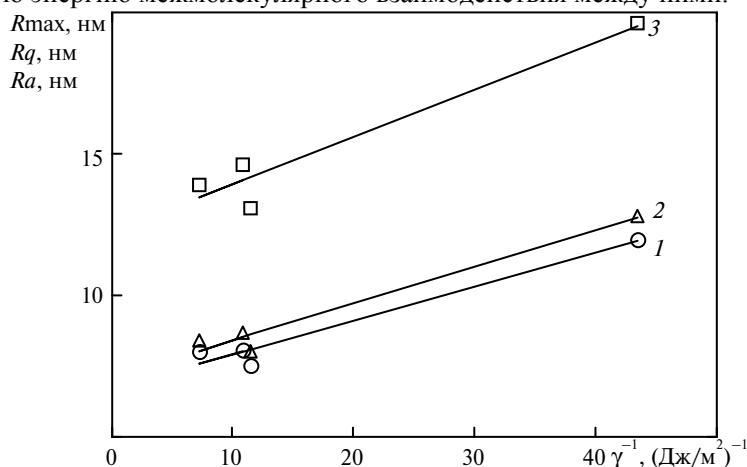


Рис. 3. Зависимости параметров шероховатости Ra (1), Rq (2), $Rmax$ (3) от плотности коллельной энергии γ .

Относительная шероховатость обработанной поверхности при полировании кристаллических материалов SiC, GaN, AlN и Al₂O₃ при помощи суспензии алмазных микропорошков (по отношению к шероховатости сапфира) $R = Ra/Ra_{\text{сапфир}}$ характеризуется соотношением: $R_{\text{SiC}}:R_{\text{GaN}}:R_{\text{AlN}}:R_{\text{сапфир}} = 0,68:0,67:0,63:1,00$.

ВЫВОДЫ

В результате исследований закономерностей формирования нанопрофиля обработанных поверхностей при механическом полировании оптоэлектронных элементов из кристаллических материалов при помощи суспензии алмазных микропорошков на основе модели образования частиц шлама и их удаления с обрабатываемой поверхности, а также компьютерного моделирования установлено, что параметры шероховатости кристаллов карбида кремния, нитрида галлия, нитрида алюминия и сапфира линейно возрастают при увеличении наиболее вероятных значений размера, высоты и площади поверхности частиц шлама, а также объема элементарной ячейки и площади обрабатываемой грани кристалла.

Изучение влияния энергии межмолекулярного взаимодействия зерен полировального порошка и обрабатываемой поверхности, определяемой константой Лифшица, на шероховатость обрабатываемой поверхности показало, что параметры Ra , Rq и $Rmax$ кристаллических материалов обратно пропорциональны энергии, затраченной на образование частицы шлама с единичной площадью поверхности.

Установлено, что при механическом полировании плоскости [0001] кристаллов карбида кремния, нитрида галлия, нитрида алюминия и сапфира при помощи суспензии алмазного микропорошка АСМ 2/1 относительная шероховатость обработанных поверхностей характеризуется соотношением $0,68:0,67:0,63:1,00$.

В результаті дослідження закономірностей механічного полірування оптоелектронних елементів з кристалічних матеріалів встановлено, що параметри шорсткості оброблених поверхонь лінійно зростають при збільшенні найбільш ймовірних значень розмірів та площі поверхні частинок шламу, об'єму елементарної комірки та

площі обробленої грані кристалу. Показана обернено пропорційна залежність параметрів шорсткості від енергії, що витрачається на утворення частинок шламу. Відносна шорсткість оброблених поверхонь кристалів карбїду кремнію, нітриду галію, нітриду алюмінію та сапфіру характеризується співвідношенням 0,68:0,67:0,63:1,00.

Ключові слова: полірування, частинка шламу, шорсткість.

The investigation of the mechanism of mechanical polishing of optoelectronic components made of crystalline materials has demonstrated that the machined surface roughness parameters grow linearly with increasing most probable values of debris particle size and surface area, unit cell volume, and surface area of the crystal plane machined. The surface roughness parameters are shown to be inversely proportional to the energy spent for the debris particle formation. The relative surface roughness of the polished silicon carbide, gallium nitride, aluminum nitride, and sapphire workpieces is represented by the following ratio: 0,68:0,67:0,63:1,00.

Keywords: polishing, debris particle, surface roughness.

1. 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 // *Funct. Mater.* – 2010. – **17**, N 4. – P. 488–494.
2. Vovk E. A., Budnikov A. T., Nizhankovskiy S. V., Krivonogov S. I., Krukhmalev A. A., Dobrotvorskaya M. V. Polishing of AlN/sapphire substrate obtained by thermochemical nitridation of sapphire // *Ibid.* – 2013. – **20**, N 2. – P. 253–258.
3. Chen X. F., Siche D., Albrecht M., Hartmann C., Wollweber J., Xu X. G. Surface preparation of AlN substrates // *Cryst. Res. Technol.* – 2008. – **43**, N 6. – P. 651–655.
4. Филатов Ю. Д., Ветров А. Г., Сидорко В. И., Филатов А. Ю., Ковалев С. В. Закономерности финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния // *Сверхтв. материалы.* – 2013. – № 5. – С. 63–71.
5. Филатов Ю. Д., Ветров А. Г., Сидорко В. И., Филатов А. Ю., Ковалев С. В., Курилович В. Д., Данильченко М. А., Прихна Т. А., Боримский А. И., Полторацкий В. Г., Куцай А. М. Полирование элементов оптико-электронной техники из монокристаллического карбида кремния // *Там же.* – 2015. – № 1. – С. 63–71.
6. Filatov O. Yu., Sidorko V. I., Kovalev S. V., Filatov Yu. D., Vetrov A. G. Polishing substrates of single crystal silicon carbide and sapphire for optoelectronics // *Funct. Mater.* – 2016. – **23**, N 1. – P. 104–110.
7. Aida H., Takeda H., Kim S.-W., Aota N., Koyama K., Yamazaki T., Doi T. Evaluation of sub-surface damage in GaN substrate induced by mechanical polishing with diamond abrasives // *Appl. Surf. Sci.* – 2014. – **292**. – P. 531–536.
8. Филатов Ю. Д., Сидорко В. И., Ковалев С. В. Алмазное полирование кристаллических материалов для оптоэлектроники // *Сверхтв. материалы.* – 2017. – № 6. – С. 73–82.
9. Yaguo Li, Yongbo Wu, Libo Zhou, Masakazu Fujimoto. Vibration-assisted dry polishing of fused silica using a fixed-abrasive polisher / *Int. J. Machine Tools Manufact.* – 2014. – **77**. – P. 93–102.
10. Filatov Y. D., Filatov O. Yu., Monteil G., Heisel U., Storchak M. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // *Proc. SPIE.* – 2010. – **7786**. – P. 778613.
11. Ling Y. Low-Damage Grinding / Polishing of Silicon Carbide Surfaces, SIMTech Technical Report (PT/01/001/PM).
12. Budnikov A. T., Vovk E. A., Kanishchev V. N., Krivonogov S. I. Investigation of residual stresses in sapphire plates after grinding and polishing // *Funct. Mater.* – 2012. – **19**, N 4. – P. 478–482.
13. Nowak G., Xia X. H., Kelly J. J., Weyher J. L., Porowski S. Electrochemical etching of highly conductive GaN single crystals // *J. Cryst. Growth.* – 2001. – **222**. – P. 735–740.
14. Golabczak M. Polishing of hard machining semiconductor materials made of silicon carbide // *Mech. Mech. Eng.* – 2011. – **15**, N 1. – P. 81–93.
15. Hui Deng, Kenji Hosoya, Yusuke Imanishi, Katsuyoshi Endo, Kazuya Yamamura. Electrochemical mechanical polishing of single-crystal SiC using CeO₂ slurry // *Electrochem. Commun.* – 2015. – **52**. – P. 5–8.
16. Yan W., Zhang Z., Guo X., Liu W., Song Z. The effect of pH on sapphire chemical mechanical polishing // *ECS J. Solid State Sci. Technol.* – 2015. – **4**, N 3. – P. 108–111.

17. Zhu H., Tessaroto L. A., Sabia R., Greenhut V. A., Smith M., Niesz D. E. Chemical mechanical polishing (CMP) anisotropy in sapphire // *Appl. Surf. Sci.* – 2004. – **236**, N 1–4. – P. 120–130.
18. Vovk E. A. Chemical-mechanical polishing of sapphire by polishing suspension based on aerosol // *Funct. Mater.* – 2015. – **22**, N 2. – P. 252–257.
19. Vovk E. A. Deagglomeration of aerosil in polishing suspension for chemical-mechanical polishing of sapphire // *Ibid* – 2015. – **22**, N 1. – P. 110–115.
20. 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 // *Сверхтв. материалы.* – 1994. – № 3. – С. 40–43.
21. Филатов Ю. Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Там же. – 2001. – № 3. – С. 36–49.
22. Филатов Ю. Д., Сидорко В. И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Там же. – 2005. – №1. – С. 58–66.
23. Филатов А. Ю., Сидорко В. И., Ковалев С. В., Филатов Ю. Д., Ветров А. Г. Производительность полирования анизотропных монокристаллических материалов для оптоэлектроники // Там же. – 2016. – № 2. – С. 65–76.
24. Филатов А. Ю., Сидорко В. И., Ковалев С. В., Филатов Ю. Д., Ветров А. Г. Шероховатость полированных поверхностей оптико-электронных элементов из монокристаллических материалов // Там же. – 2016. – № 3. – С. 63–76.
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., Хайзель У., Сторчак М., Монтей Г. 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., Ковалев С. В., Хайзель У., Сторчак М. Шероховатость поверхностей при финишной алмазно-абразивной обработке // Там же. – 2009. – № 3. – С. 68–74.
28. 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.
29. Harima H., Properties of GaN and related compounds studied by means of Raman scattering // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2002. – **14**. – P. 967–993.
30. Davydov V. Yu., Kitaev Yu. E., Goncharuk I. N., Smirnov A. N., Graul J., Semchinova O., Uffmann D., Smirnov M. B., Mirgorodsky A. P., Evarestov R. A. Phonon dispersion and Raman scattering in hexagonal GaN and AlN // *Phys. Rev.* – **58**, N 19. – P. 12899–12907.
31. Asghar 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.
32. Kadleikova M., Breza J., Vesely M. Raman spectra of synthetic sapphire // *Microelectr. J.* – 2001. – N 32. – P. 955–958.

Поступила 22.08.16