

# Исследование процессов обработки

УДК 621.923

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

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

\**filatov@ism.kiev.ua*

## **Формообразование плоских поверхностей оптоэлектронных элементов при алмазном полировании**

*На основе физико-статистической модели образования частиц шлама обрабатываемого материала при алмазном полировании проведен анализ производительности съема и точности геометрической формы плоских поверхностей оптоэлектронных элементов из кварца, нитрида алюминия и нитрида галлия. Определены наиболее рациональные значения кинематических параметров настройки станка, при которых достигается требуемая точность формообразования. Приведены результаты экспериментальной проверки данных расчета производительности полирования и отклонения формы обработанных поверхностей.*

***Ключевые слова:** алмазное полирование, производительность, отклонение формы.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Повышение точности формообразования прецизионных поверхностей деталей электронной техники и оптических систем при алмазном полировании достигается за счет управления кинематическими и режимными параметрами процесса обработки, выбора функционально-ориентированных конструкции притира и характеристик полировальной суспензии, моделирования процесса обработки и применения экспериментально-расчетных методов определения его показателей. До недавнего времени существующие модели процессов механической обработки, а также методики расчета интенсивности съема материала с обрабатываемой поверхности, износа инструмента и эволюции их формы при механической обработке неметаллических материалов базировались на уравнении износа Престона (Preston) [1–3] и применялись при допущениях и ограничениях, правомерных лишь для определенных условий. В настоящее время для изучения закономерностей фор-

мообразования полированных поверхностей деталей из неметаллических материалов, в частности элементов оптико-электронной техники из керамики (нитрид алюминия AlN), оптических (кварц SiO<sub>2</sub>, сапфир Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и полупроводниковых (карбид кремния SiC, нитрид галлия GaN) кристаллов, широко используется обобщенная модель съема обрабатываемого материала, основанная на кластерной модели износа [4] и физико-статистической модели [5, 6] образования и удаления с обрабатываемой поверхности частиц шлама.

Целью исследования является изучение влияния кинематических параметров настройки станка на точность формообразования плоских поверхностей оптоэлектронных элементов из керамики и полупроводниковых кристаллов, а также определение их наиболее рациональных значений, при которых достигается требуемая точность геометрической формы полированных поверхностей.

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ АЛМАЗНОМ ПОЛИРОВАНИИ

Интенсивность съема обрабатываемого материала в процессе полирования суспензией полировального порошка в зависимости от радиуса  $\rho$  круговых зон обрабатываемой поверхности определяется в соответствии с формулой

$$Q(\rho) = \eta(\rho) L_T,$$

где  $\eta(\rho)$  – коэффициент объемного износа [5]). Значения коэффициента  $\eta(\rho)$  находятся методом компьютерного моделирования [7], исходя из параметров процесса полирования и характеристик обрабатываемого материала и полировального порошка. Размеры  $d(i)$  и площадь  $S_i$  поверхности  $i$ -й частицы шлама, их количество  $N(i)$  на обрабатываемой поверхности, время  $t_k = 2d_a/(\omega_1 D_1)$  контакта с поверхностью зерна полировального порошка, средний размер  $d_a$  зерен полировального порошка, диаметр  $D_1$  и угловая скорость  $\omega_1$  вращения блока деталей, диаметр  $D_2$  и угловая скорость  $\omega_2$  вращения полировальника, коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала  $\lambda$ , температура в контактной зоне  $T$ , номинальное давление  $p_a$  прижима полировальника к детали, площадь обрабатываемой поверхности  $S$ , средняя длина  $L_T = 2\pi R_s$  пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности полировальника, эффективный радиус  $R_s = (S/\pi)^{1/2}$  блока деталей, скорость  $u(\rho)$  относительного перемещения позволяют найти значения безразмерного параметра  $\vartheta(\rho) = \frac{\lambda T L_T}{p_a u(\rho) S}$  и корни  $\beta(\rho, i)$  системы  $m$  трансцендентных уравнений

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

а также рассчитать коэффициент объемного износа  $\eta(\rho) = \sum_{i=1}^m \frac{d(i)^2}{4\beta(\rho, i)t_k}$  [7].

Плоские поверхности элементов для оптики и микроэлектроники из кварца, нитрида алюминия и нитрида галлия полировали при помощи суспензии алмазного микропорошка АСМ 2/1 на шлифовально-полировальном станке мод. 2ШП-200М при следующих режимных и кинематических параметрах: частота вращения оловянного полировальника диаметром 100 мм – 90 об/мин, усилие прижима блока деталей диаметром 60 мм к полировальни-

ку – 50,5 Н, средняя температура в зоне контакта – 300 К, смещение штриха – 30 мм, длина  $L \in [10, 40]$  и несимметрия  $e_0 \in [30, 50]$  штриха, время цикла полирования  $t = 1$  ч. Съем обрабатываемого материала измеряли весовым методом. Неплоскостность поверхности детали, обработанной в описанных условиях, измеряли при помощи оптиметра мод. ИКВ-3.

Кристаллы кварца (число элементов на блоке – 4, плотность – 2,65 г/см<sup>3</sup>, энергия связи – 5,29 эВ, твердость по Моосу – 7, коэффициент теплопроводности – 10,7 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 4,34, постоянные решетки  $a = 0,4913$  нм и  $c = 0,5404$  нм, частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов SiO<sub>2</sub> – 440, 605, 800 и 1060 см<sup>-1</sup> [8, 9]) характеризовались константой Лифшица (12 мэВ), средним значением безразмерного параметра  $\vartheta \approx 28$  и величиной наиболее вероятного значения размеров частиц шлама 3,4 нм. Образцы керамики на основе AlN (число элементов на блоке – 2, плотность – 3,26 г/см<sup>3</sup>, энергия связи – 6,2 эВ, твердость по Моосу – 7,5, коэффициент теплопроводности – 200 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 8,5, постоянные решетки  $a = 0,3112$  нм и  $c = 0,4982$  нм, частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов AlN – 248,6, 611,0, 657,4, 670,8, 890,0 и 912,0 см<sup>-1</sup> [10, 11]) характеризовались константой Лифшица (9,4 мэВ), средним значением безразмерного параметра  $\vartheta \approx 590$  и величиной наиболее вероятного значения размеров частиц шлама 2,3 нм. Монокристаллы нитрида галлия GaN (число элементов на блоке – 7, плотность – 6,15 г/см<sup>3</sup>, энергия связи – 5,4 эВ, твердость по Моосу – 6, коэффициент теплопроводности – 130 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 9,5, постоянные решетки  $a = 0,3189$  нм и  $c = 0,5185$  нм, частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов GaN – 144,0, 531,8, 558,8, 567,6, 734,0 и 741,0 см<sup>-1</sup> [8, 10–13]) характеризовались константой Лифшица (17,0 мэВ), средним значением безразмерного параметра  $\vartheta \approx 214$  и величиной наиболее вероятного значения размеров частиц шлама 2,4 нм [14–18].

С учетом того, что скорость относительного перемещения  $u(\rho)$  элементарного участка обрабатываемой поверхности, усредненная по координатным переменным: радиусу круговых зон инструмента  $r \in [l - \rho, l + \rho]$  и расстоянию между центрами полировальника и детали  $l \in [e_0 - L/2, e_0 + L/2]$ , выражается формулой

$$u(\rho) = \frac{1}{2\rho L} \int_{e_0 - \frac{L}{2}}^{e_0 + \frac{L}{2}} dl \int_{l-\rho}^{l+\rho} \sqrt{(\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 r^2 - \omega_1 \rho^2) + \omega_1 \omega_2 l^2} dr,$$

рассчитаны значения коэффициентов объемного износа в зависимости от радиуса круговых зон  $\rho$  и показано их незначительное увеличение при переходе от центральной зоны к периферийной (таблица). На рис. 1 приведены зависимости интенсивности съема обрабатываемого материала  $Q(\rho)$ , характерные для полирования кварца, нитридной керамики на основе AlN и полупроводниковых кристаллов GaN. При любых значениях кинематических параметров настройки станка по длине и несимметрии штриха в крайних зонах обрабатываемой поверхности величина съема больше, чем в центральных, т. е. форма обработанной поверхности – выпуклая (“бугор”), а отклонение от плоскостности определяется величиной  $\delta = \frac{Q(D_1/2) - Q(\rho=0)}{S} t$ .

**Результаты расчета интенсивности съема обрабатываемого материала и экспериментального определения их производительности полирования**

Показатель	Обрабатываемый материал		
	SiO <sub>2</sub>	AlN	GaN
Площадь обрабатываемой поверхности $S, \text{ см}^2$	20,5	26,0	8,1
Коэффициент заполнения блока деталей $K = 4S/\pi D_1^2$	0,72	0,92	0,29
Коэффициент объемного износа, $\eta \cdot 10^{11}, \text{ м}^2/\text{с}$	1,83–1,86	1,32–1,34	2,60–2,66
Интенсивность съема материала в центральной круговой зоне, $\text{м}^3/\text{с}$	$2,9 \cdot 10^{-12}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$2,6 \cdot 10^{-12}$
Экспериментальные значения производительности съема,			
мг/мин	0,4	0,4	1,0
мкм/ч	4,8	3,1	12,0
$\text{м}^3/\text{с}$	$2,7 \cdot 10^{-12}$	$2,2 \cdot 10^{-12}$	$2,7 \cdot 10^{-12}$
Погрешность расчета, %	8	8	3

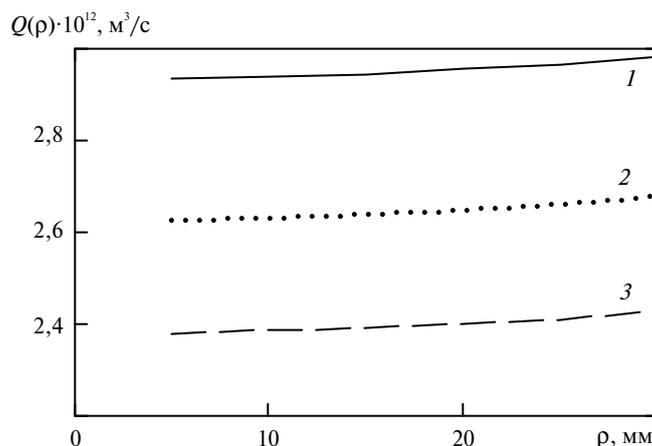


Рис. 1. Зависимость производительности полирования обрабатываемых материалов от радиуса круговых зон детали: SiO<sub>2</sub> (1), GaN (2), AlN (3).

В результате моделирования процесса формообразования плоских прецизионных поверхностей и исследования влияния кинематических параметров настройки станка (длины  $L$  и несимметрии  $e_0$  штриха) на производительность полирования и точность формы обработанных поверхностей оптоэлектронных элементов установлено, что величина объема удаленного материала достигает максимального значения при увеличении несимметрии  $e_0$  и длины  $L$  штриха, а форма обрабатываемой поверхности остается выпуклой при произвольных настройках по кинематическим параметрам. На рис. 2 приведены линейно убывающие зависимости максимального и минимального отклонения от плоскостности обработанных поверхностей от коэффициента заполнения блока деталей при полировании нитрида галлия, кварца и нитрида алюминия, из которых следует, что чем больше площадь обрабатываемой по-

верхности по отношению к размерам блока, тем выше точность формообразования элементов.

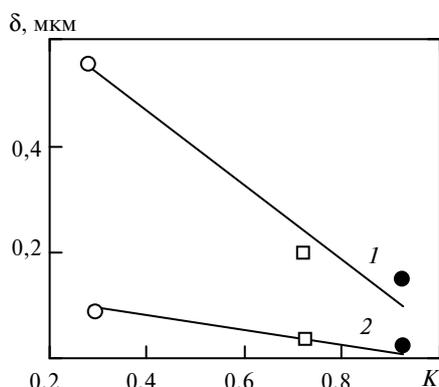


Рис. 2. Зависимость максимального (1) и минимального (2) отклонения от плоскостности обработанной поверхности от коэффициента заполнения блока деталей при полировании нитрида галлия (○), кварца (□) и нитрида алюминия (●).

При увеличении параметра  $e_0$  наблюдается уменьшение отклонения от плоскостности обрабатываемой поверхности при любых  $L$ . На рис. 3 представлена зависимость неплоскостности элементов из нитрида галлия, кварца и нитрида алюминия от несимметрии штриха при  $L = 10$  мм:  $\delta = \delta(e_0)|_{L=\text{const}}$ .

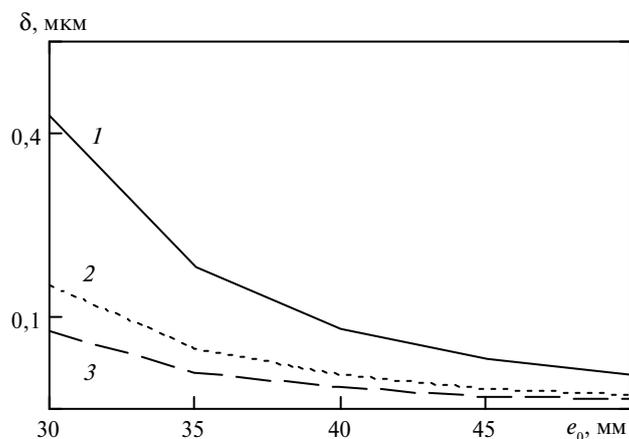


Рис. 3. Зависимость отклонения от плоскостности обработанной поверхности от несимметрии штриха ( $L = 10$  мм): GaN (1), SiO<sub>2</sub> (2), AlN (3).

Зависимость отклонения от плоскостности обрабатываемой поверхности от длины штриха  $\delta = \delta(L)|_{e_0=\text{const}}$  – монотонно-возрастающая и лежит в пределах 0,05–0,20 мкм/ч (рис. 4).

Отклонение от плоскостности обработанных поверхностей оптоэлектронных элементов из нитрида галлия, кварца и нитрида алюминия при различном заполнении блока деталей при кинематических параметрах  $e_0 = 30$ –50 мм,  $L = 10$ –50 мм характеризуется значением  $\delta \approx 0,2$  мкм. При этом среднее значение производительности съема обрабатываемого материала составляет, мкм/ч: 4,8 – для кварца, 3,1 – для нитрида алюминия, 12,0 – для нитрида

галлия, что позволяет выполнять операцию механического полирования оптоэлектронных элементов в течение длительного времени при величине отклонения от плоскостности, не превышающей 0,25 мкм.

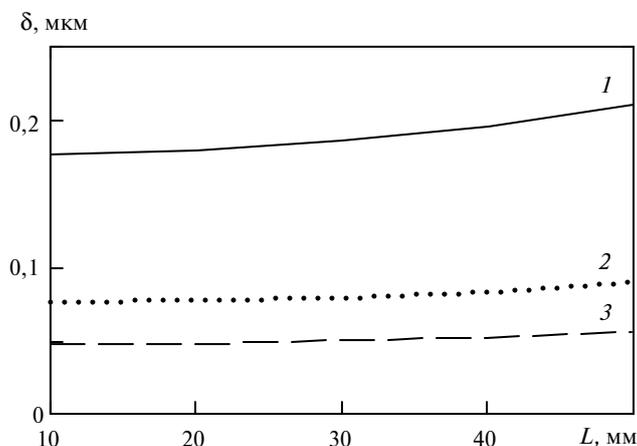


Рис. 4. Зависимость отклонения от плоскостности обработанной поверхности от длины штриха ( $e_0 = 40$  мм): GaN (1), SiO<sub>2</sub> (2), AlN (3).

При этом достигается точность формы приблизительно  $N = 1$  (интерференционных колец), соответствующая требованиям, предъявляемым к оптическим поверхностям высокой и средней точности.

#### ВЫВОДЫ

Исследованы закономерности образования формы обрабатываемой плоской поверхности прецизионных оптоэлектронных элементов из кварца, нитридной керамики на основе AlN и полупроводниковых кристаллов GaN при алмазном полировании по традиционной технологии. На основе физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама, расчета относительной скорости перемещения, усредненной по несимметрии  $e_0$  и длине  $L$  штриха, получены координатные зависимости величины съема обрабатываемого материала, характеризующие эволюцию формы полированной поверхности и величину отклонения от плоскостности. Результаты исследования влияния кинематических параметров настройки по несимметрии и длине штриха на точность геометрической формы обрабатываемой поверхности позволили определить их наиболее рациональные значения, при которых достигается требуемая точность формообразования плоских прецизионных поверхностей элементов из SiO<sub>2</sub>, AlN и GaN при алмазном полировании. Результаты теоретического анализа формы поверхностей оптоэлектронных элементов подтверждены экспериментальными данными.

*На основі фізико-статистичної моделі утворення частинок шламу оброблюваного матеріалу при алмазному поліруванні проведено аналіз продуктивності зняття та точності геометричної форми плоских поверхонь оптоелектронних елементів з кварцу, нітриду алюмінію і нітриду галію. Визначені найбільш доцільні значення кінематичних параметрів налагодження верстата, за яких досягається потрібна точність формоутворення. Наведено результати експериментальної перевірки даних розрахунку продуктивності полірування та відхилення форми оброблених поверхонь.*

**Ключові слова:** алмазне полірування, продуктивність, відхилення форми.

*On the basis of physical-statistical models of particle formation of sludge processed material with a diamond polishing the analysis of the performance of removal rate and accuracy of the geometric shape of flat surfaces of the optoelectronic elements of quartz, aluminium nitride and gallium nitride. Defined the most rational values of the kinematic settings of the machine, which achieves the required accuracy of forming. The results of experimental validation data the calculation of performance of polishing and form deviations of machined surfaces.*

**Keywords:** diamond polishing, performance, form deviation.

1. Fahnlé O. W., Wons T., Koch E. et al. ITIRM as a tool for qualifying polishing processes // Appl. Optics. – 2002. – **41**, N 19/1. – P. 4036–4038.
2. Ouma D. O., Boning D. S., Chung J. E. et al. Characterization and modeling of oxide chemical-mechanical polishing using planarization length and pattern density concepts // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. – 2002. – **15**, N 2. – P. 232–243.
3. Vukkadala P., Turner K. T., Sinha J. K. Impact of wafer geometry on CMP for advanced nodes // J. Electrochem. Soc. – 2011. – **158**, N 10. – P. 1002–1009.
4. Filatov Yu. D., Filatov O. Yu., Monteil G. et al. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // Optical Eng. – 2011. – **50**, N 6, art. 063401.
5. Филатов Ю. Д., Сидорко В. И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании / Сверхтв. материалы. – 2005. – № 1. – С. 58–66.
6. Filatov Yu., Sidorko V., Formation of flat optical surfaces in polishing // Jemna Mechanika a Optika. – 2009. – N 9. – P. 239–243.
7. Филатов А. Ю., Сидорко В. И., Ковалев С. В. и др. Производительность полирования анизотропных монокристаллических материалов для оптоэлектроники // Сверхтв. материалы. – 2016. – № 2. – С. 65–76.
8. Galashev A. Y. Computer study of the Raman spectra and infrared optical properties of gallium nitride and gallium arsenic nanoparticles with SiO<sub>2</sub> core and shell // J. Nanopart. Res. – 2014. – N 16. – P. 2351–2368.
9. Crystal quartz // Almaz Optics, Inc. (Quartz, crystal quartz, crystalline quartz). – <http://www.almazoptics.com/Quartz.htm>
10. Properties of the III-nitride semiconductors // The semiconductors-information. – <http://www.semiconductors.co.uk/nitrides.htm>
11. 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.
12. Narima H. Properties of GaN and related compounds studied by means of Raman scattering // J. Phys.: Condens. Matter. – 2002. – **14**. – P. 967–993.
13. Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия. – М.: Техносфера, 2011. – 592 с.
14. Филатов А. Ю., Ветров А. Г., Сидорко В. И. и др. Закономерности финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния // Сверхтв. материалы. – 2013. – № 5. – С. 63–71.
15. 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. 63–74.
16. Filatov Yu. D., Filatov O. Yu., Monteil G. et al. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // Proc. SPIE. – 2010. – **7786**, art. 778613.
17. Филатов Ю. Д., Розов В. В. Кластерная модель механизма усталостного износа SiO<sub>2</sub>-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия. Часть 1 // Сверхтв. материалы. – 1994. – № 3. – С. 40–43.
18. Филатов Ю. Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла // Там же. – 1991. – № 5. – С. 61–65.

Поступила 12.04.16