

УДК 621.9

Ю.Д. Филатов, д.т.н., проф.
В.И. Сидорко, д.т.н., с.н.с.
А.Ю. Филатов, к.т.н., н.с.
С.В. Ковалев, к.т.н., н.с.
А.Г. Ветров, инж.
Я.Л. Сильченко, инж.
В.А. Ковалев, к.т.н., доц.
М.А. Данильченко, аспир.

Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины

ПОЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И ПОДЛОЖЕК ИЗ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Приведены результаты исследования закономерностей полирования плоских поверхностей оптико-электронных элементов из монокристаллических карбида кремния и сапфира и показано, что в качестве критерия эффективности полирования целесообразно использовать коэффициенты шероховатости, определяющие минимально допустимые значения высотных параметров.

Ключевые слова: полирование; шероховатость; монокристалл; карбид кремния; сапфир.

Постановка проблемы. Полированные поверхности элементов и подложек из монокристаллических материалов, должны удовлетворять требованиям по точности формы (3–5 интерференционных колец) и по качеству обработки («царапина–точка» от 60–40 до 20–10, U.S., MIL-PRF-13830B). Поверхности подложек, подготовленные под нанесение эпитаксиального слоя (epi-ready), должны удовлетворять требованиям по точности ориентации плоскости кристалла ($\pm 0,2-0,5^\circ$), плотности дислокаций (10^3 см^{-2}), плотности микропапов ($< 30 \text{ см}^{-2}$), структурному совершенству (полуширина линии качания – 30–50 угл. с), по неплоскостности ($< 10 \text{ мкм}$ на диаметре 75 мм) и шероховатости ($Ra = 0,3-1,0 \text{ нм}$). Шероховатость обработанных поверхностей существенно зависит от размеров частиц шлама (ЧШ) и свойств полировальных суспензий и коллоидных систем из наночастиц [1–4], оптимизация характеристик которых является актуальной задачей.

Целью исследования являлось изучение влияния свойств обрабатываемого монокристаллического сапфира и полировальной суспензии или коллоидной системы на шероховатость обработанных поверхностей.

Закономерности полирования монокристаллов карбида кремния и сапфира. Плоские поверхности элементов из карбида кремния (плоскость *C*) и сапфира (плоскость *A*) полировали на шлифовально-полировальном станке мод. 2ШП-200М при частоте вращения полировальника 90 об./мин., давлении прижима детали к притиру 0,003–0,005 МПа и средней температуре в зоне контакта 300 К. Монокристаллический карбид кремния (плотность 3,21 г/см³, коэффициент теплопроводности 490 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 6,5, постоянные решетки $a = 0,3073$ нм и $c = 1,511$ нм [5]) характеризовался частотами собственных колебаний молекулярных фрагментов SiC: 794 см⁻¹ и 1000 см⁻¹ [6, 7]. Монокристаллы сапфира (плотность 3,98 г/см³, постоянные решетки $a = 0,4758$ нм, $c = 1,2991$ нм, для плоскости *A*: коэффициент теплопроводности 30,3 Вт/(м·К), статическая диэлектрическая проницаемость – 9,3) характеризовались частотами собственных колебаний молекулярных фрагментов Al₂O₃: 573 см⁻¹, 642 см⁻¹ и 748 см⁻¹.

Полировали монокристаллы карбида кремния и сапфира при помощи суспензий из алмазных микропорошков (1), порошков кубического нитрида бора cBN (2) и порошков МАХ-фазы Ti₃AlC₂ (3) [5, 7], а также коллоидных систем из наночастиц (4) и коллоидного кремнезема (5). Частоты собственных колебаний (см⁻¹) порошков алмаза – 1135 и 1332, cBN – 1056, 1100, 1304 и порошков МАХ-фазы Ti₃AlC₂ – 260, 420, 605, 1320 и 1590. Статическая диэлектрическая проницаемость полировальных порошков алмаза – 5,7, cBN – 2,5 и Ti₃AlC₂ – 3,5 [7].

На основе результатов исследования механизма формирования шероховатости обрабатываемой поверхности [8] разработан метод компьютерного моделирования микропрофиля, который позволяет рассчитать высоту микро- и нанонеровностей. Высота нанонеровностей полированной поверхности пропорциональна поверхностной плотности частиц шлама (квадрату модуля функции состояния ЧШ $|\psi|^2$, [м⁻¹]) в соответствии с формулой $Z(x) = k|\psi|^2$ [7–8], а коэффициент пропорциональности k определяется как d_i^2 (d_i – размер частиц шлама). Метод компьютерного моделирования нанопрофиля поверхностей элементов из монокристаллических материалов при полировании основан на методе Монте-Карло и позволяет рассчитать высоту неровностей профиля (профилограмму) поверхности $Z(x)$. По модельным профилограммам определялись высотные параметры шероховатости: среднее арифметическое отклонение профиля R_a ,

среднее квадратичное отклонение профиля Rq и наибольшая высота профиля R_{\max} .

При усреднении высотных параметров шероховатости по пяти модельным профилограммам получены значения Ra , Rq , R_{\max} , величины отношения $\chi = R_{\max}/Ra$, а также коэффициенты относительной шероховатости $k_a = Ra/a_v$, $k_q = Rq/a_v$ и $k_m = R_{\max}/a_v$, нормированные на наиболее вероятный размер a_v частицы шлама.

В отличие от процессов шлифования неметаллических материалов при условии $d_i > R_{\max}$, когда коэффициенты шероховатости k_a , k_q , $k_m < 1$ и $\chi > 1$ [8–9], для полирования монокристаллического карбида кремния и сапфира при условии $d_i \leq R_{\max}$ коэффициенты k_a , k_q , k_m , $\chi > 1$ и уменьшаются при улучшении качества обработки. Для сравнения эффективности применения различных полировальных составов достаточно найти минимальные значения указанных коэффициентов [10]. Минимальными значениями коэффициентов шероховатости k_a , k_q , k_m , χ характеризуется шероховатость поверхностей элементов из монокристаллического карбида кремния, обработанных при помощи коллоидной системы (4), и сапфира, полирование которых осуществлялось при помощи коллоидных систем (4) и (5). Сравнивая значения этих коэффициентов для процессов шлифования и полирования, можно заключить, что коэффициенты шероховатости k_a , k_q и k_m уменьшаются в 10–100 раз, что позволяет сделать вывод о принципиальных отличиях в механизмах формирования микро- и нанорельефа обрабатываемой поверхности. Сравнивая значения приведенных коэффициентов шероховатости для процессов обработки карбида кремния и сапфира при помощи различных полировальных составов, можно утверждать, что полирование целесообразно осуществлять при помощи суспензий полировальных порошков (1)–(3), а нанополирование с помощью коллоидных систем из наночастиц (4)–(5).

Вывод. Таким образом, в результате компьютерного моделирования нанопрофиля обработанных поверхностей элементов оптоэлектроники из карбида кремния и сапфира построены расчетные профилограммы, по которым определены значения высотных параметров шероховатости Ra , Rq и R_{\max} и коэффициентов шероховатости k_a , k_q , k_m , χ , по минимальным значениям которых можно количественно оценить эффективность полирования при помощи различных полировальных составов.

Список использованной литературы:

1. New technology of precision polishing of glass optic / *V.V. Rogov, Y.D. Filatov, W.Kottler, V.P. Sobol* // *Optical Engineering*. – Vol. 40, august 2001. – Pp. 1641–1645.
2. *Поперенко Л.В.* Технологія обробки оптичних поверхонь : навч. посібник / *Л.В. Поперенко, Ю.Д. Філатов*. – К.: Вид.-поліграф. центр «Київський університет», 2004. – 166 с.
3. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials / *Y.D. Filatov, O.Y. Filatov, G.Monteil et al.* // *Optical Engineering*. – 2011.
4. *Філатов Ю.Д.* Моделювання процесів механічної обробки матеріалів : навч. посіб. / *Ю.Д. Філатов*. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 176 с.
5. *Properties of Silicon Carbide* edited by Gary Lynn Harris // *INSPEC, Institution of Electrical Engineers*. – London, United Kingdom, 1995. – 289 p.
6. Закономерности финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния / *Ю.Д. Філатов, А.Г. Ветров, В.И. Сидорко* и др. // *Сверхтвердые материалы*. – 2013. – № 5. – С. 63–71.
7. Полирование элементов оптико-электронной техники из монокристаллического карбида кремния / *Ю.Д. Філатов, А.Г. Ветров, В.И. Сидорко* и др. // *Сверхтв. материалы*. – 2015. – № 1. – С. 63–71.
8. *Filatov Yu.D.* Mechanism of formation of surface microrelief in machining glass / *Yu.D. Filatov* // *J. Superhard Mater.* – 1991. – 13(5). – Pp. 63–67.
9. *Філатов Ю.Д.* Шероховатость поверхности при обработке стекла / *Ю.Д. Філатов, В.В. Рогов, К.С. Громов* // *Сверхтвердые материалы*. – 1993. – № 4. – С. 42–46.
10. Chemical mechanical polishing (CMP) anisotropy in sapphire / *H.Zhu, L.A. Tessaroto, R.Sabia* et al. // *Applied Surface Science*. – 2004. – Vol. 236. – Issue 1–4. – Pp. 120–130.

ФИЛАТОВ Юрий Данилович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины.

Научные интересы:

– физико-химия прецизионной алмазно-абразивной обработки неметаллических материалов.

Тел.: (044) 379–11–09.

E-mail: filatov@ism.kiev.ua.

СИДОРКО Владимир Игоревич – доктор технических наук, директор ИПЦ «АЛКОН» НАН Украины.

Научные интересы:

– физико-механические закономерности прецизионной алмазно-абразивной обработки природного камня.

Тел.: (044) 379–11–09.

E-mail: sidorko@ism.kiev.ua.

ФИЛАТОВ Александр Юрьевич – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины.

Научные интересы:

– физические основы прецизионной алмазно-абразивной обработки деталей электронной техники и оптических систем.

Тел.: (044) 379–11–09.

E-mail: filatov@ism.kiev.ua.

КОВАЛЕВ Сергей Викторович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины.

Научные интересы:

– технологические основы алмазно-абразивной обработки природного и синтетического камня.

Тел.: (044) 379–11–09.

E-mail: filatov@ism.kiev.ua.

ВЕТРОВ Анатолий Григорьевич – инженер Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины.

Научные интересы:

– разработка функционально ориентированных инструментов для прецизионной алмазно-абразивной обработки неметаллических материалов.

Тел.: (044) 430–05–39.

E-mail: filatov@ism.kiev.ua.

СИЛЬЧЕНКО Ярослав Леонидович – инженер Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины.

Научные интересы:

– разработка новых конструкций и характеристик инструмента для прецизионной алмазно-абразивной обработки неметаллических материалов.

Тел.: (044) 430–05–39.

E-mail: filatov@ism.kiev.ua.

КОВАЛЕВ Виктор Андреевич – кандидат технических наук, доцент НТУУ «Киевский политехнический институт».

Научные интересы:

– технология, станки и инструмент для алмазно-абразивной обработки природного и синтетического камня.

Тел.: (044) 454–95–27.

E-mail: philosof@online.ua.

ДАНИЛЬЧЕНКО Мария Андреевна – ассистент НТУУ «Киевский политехнический институт», аспирант Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины.

Научные интересы:

– технологические основы алмазно-абразивной обработки природных и синтетических кристаллических материалов.

Тел.: (044) 454–95–27.

E-mail: rudenko_m@i.ua.

Статья поступила в редакцию 20.07.2015