

Ю.Д. Филатов, д.т.н., проф.
С.В. Ковалев, к.т.н., м.н.с.
А.Ю. Филатов, к.т.н., м.н.с.
А.Г. Ветров, инж.

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Ук-
раины*

ПОЛИРОВАНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ САПФИРА ПРИ ПОМОЩИ АЛМАЗНЫХ МИКРОПОРОШКОВ

Приведены результаты исследования закономерностей алмазного полирования оптоэлектронных деталей из сапфира. Применение обобщенной модели образования и удаления частицы шлама позволило рассчитать величину съема обрабатываемого материала, практически совпадающую с экспериментальными данными.

Ключевые слова: алмазное полирование, оптоэлектронные детали, частицы шлама.

Постановка проблемы. Широкое применение сапфира в оптоэлектронике как основного материала для изготовления светоизлучающих диодов высокой яркости и твердотельных лазеров, излучающих в синей, зеленой и других областях видимого спектра, обусловлено все более возрастающей потребностью приборостроения, масс-медиа, рекламной индустрии, автомобиле- и авиастроения, автомобильного и железнодорожного транспорта, а также производства оборонной и военной спецтехники, в которых применяются современные энергосберегающие приборы и устройства (индикаторы, цветные экраны и мониторы, лампы освещения, габаритные огни, светофоры). Перспективность его использования при производстве светодиодов объясняется тем, что именно на подложках из сапфира наиболее целесообразно выращивать эпитаксиальный слой нитрида галлия, который и служит основой для создания цветных светодиодов.

Тонкое алмазное и супертонкое алмазное шлифование поверхностей деталей из сапфира осуществляется при помощи алмазных инструментов со специальными функционально ориентированными характеристикой и конструкцией рабочего слоя. Операция полирования осуществляется в два перехода: полирование при помощи алмазных порошков и химико-механическое полирование при помощи нанопорошков в свободном состоянии. Проблемы формообразования прецизионных оптических поверхностей деталей из сапфира состоят в необ-

ходимости стабільного во времени съема обрабатываемого материала (постоянной интенсивности изнашивания) и обеспечения высокой точности формы (макропрофиль) и минимальной шероховатости (микропрофиль) обработанных поверхностей.

В настоящее время изучен механизм диспергирования частиц шлама и их распределение по площадям поверхности, описаны закономерности формообразования прецизионных поверхностей, разработаны методы прогнозирования точности их формы и оптимизации кинематических и режимных параметров процесса, а также расчета функционально-ориентированных конструкций и характеристик рабочего слоя инструмента, разработаны методики расчета интенсивности съема обрабатываемого материала и компьютерного моделирования микро- и макрорельефа поверхностей детали и инструмента.

Изложение основного материала. Закономерности съема обрабатываемого материала при полировании сапфира. Основными моделями при разработке технологических процессов формообразования прецизионных поверхностей являются кластерная модель износа поверхностей детали и инструмента при полировании [1–4] и физико-статистическая модель образования и удаления частиц шлама и частиц износа инструмента в процессе финишной алмазно-абразивной обработки неметаллических материалов [4–6].

Полирование плоских поверхностей деталей из сапфира – 3 подложки, заблокированных на блоке диаметром 60 мм, общей площадью 16,75 см², осуществлялось при помощи суспензии из алмазных микропорошков АСМ 2/1 на оловянном полировальнике диаметром 100 мм на шлифовально-полировальном станке мод. 2ШП-200М. Частота вращения притира составляла 90 об/мин., усилие прижима детали к инструменту – 50,5 Н, смещение штриха $e_p = 30$ мм, длина штриха $L = 50$ мм, время цикла полирования – 15 мин.

Расчет производительности съема обрабатываемого материала при полировании осуществлялся на основе обобщенной модели образования и удаления из обрабатываемой поверхности частиц шлама. Объем снятого материала при полировании определялся через коэффициент η объемного износа [4–5, 7–8]. В зависимости от размеров $d_1(i)$ частиц шлама и времени их контакта с поверхностью инструмента коэффициент η объемного износа рассчитывался по формуле:

$$\eta = \sum_i \frac{d(i)^2}{4\beta(i)t_c},$$

в которой значения $\beta(i)$ представляют собой корни трансцендентных уравнений:

$$\frac{\exp(-\beta(i)^2)}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\beta(i))} = \frac{1}{N(i) S_i} \sqrt{L_t d_a S_c \mathfrak{G}}, \quad (1)$$

где $N(i)$ – количество i -тых частиц шлама на обрабатываемой поверхности; $L_t = 2\pi e_0$ – длина пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности рабочего слоя инструмента; $\mathfrak{G} = \frac{\lambda T L_t}{p_a u S_c}$ –

безразмерный параметр; p_a – номинальное давление прижима инструмента к детали; $u = \omega_1 e_p$ – скорость относительного перемещения инструмента и детали; ω_1 – угловая скорость вращения детали; S_c – площадь контакта поверхностей инструмента и детали; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала; T – температура в контактной зоне; S_i – площадь поверхности i -той частицы; d_a – средний размер зерен полировального порошка.

Параметры и характеристики сапфира [9]: плотность $\rho = 3,98 \cdot 10^3$ кг/м³; статическая диэлектрическая проницаемость – 10,0; $\lambda = 23,1$ Вт/(м·К); энергия связи $E_b = 6,4$ эВ (148 ккал/моль). Частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов, определяемые по спектрам инфракрасного поглощения (ИК) или комбинационного рассеяния (КР), составляют для сапфира: $\omega_{01} = 12,8 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ (680 см⁻¹), $13,9 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ (740 см⁻¹) и $14,7 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ (780 см⁻¹) [10] и алмаза $\omega_{02} = 21,4 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ (1135 см⁻¹) и $25,1 \cdot 10^{13}$ с⁻¹ (1332 см⁻¹) [11] соответственно.

Число молекулярных фрагментов в возбужденном кластере при взаимодействии обрабатываемой поверхности сапфира с алмазными зёрнами в многомодовом режиме выражается формулой

$$\xi = \sum_{lk} \frac{\omega_{01l}^4}{(\omega_{01l}^2 - \omega_{02k}^2)^2} \quad (\text{где } l = \overline{0,2} \text{ и } k = \overline{0,1} \text{ – номера частот колебаний}$$

фрагментов). Энергия кластера при этом составляет

$$E_{cl} = \hbar \sum_{lk} \frac{\omega_{01l}^5}{(\omega_{01l}^2 - \omega_{02k}^2)^2}.$$

Для описанных условий число фрагментов в кластере $\xi_0 = 2$, а энергия кластера $E_{c10} \approx 0,2$ эВ, что значительно меньше, чем энергия связи E_b . Для превращения кластера в частицу шлама, то есть для его отделения с обрабатываемой поверхности он должен перейти в возбужденное состояние, совершив $\operatorname{round}(E_b/E_{c10}) = 31$ квантовый переход, в результате которых число фрагментов в кластере увеличится до $\xi = 62$, а его энергия достигнет значения $E_{cl} = 6,4$ эВ.

Площадь поверхности i -той частицы шлама определяется как:

$$S_i = S_0(i + 1),$$

где $i = \overline{0, n-1}$, $n = 5$ – число выборок.

Площадь поверхности кластера S_{ii} зависит от структуры обрабатываемого материала и определяется в зависимости от числа молекулярных фрагментов $\xi = 62$. Для кристаллов сапфира постоянные решетки составляют $a = 0,4758$ нм и $c = 1,2991$ нм [9]). Исходя из параметров структуры сапфира, с учетом соотношения $k_1 k_2 k_3 = 63$ ($k_1 = 3$, $k_2 = 3$, $k_3 = 7$), через постоянные решетки можно определить площадь поверхности кластера $S_0 = 2k_1 k_2 a^2 + 2k_1 k_3 a c + 2k_2 k_3 a c \approx 56,0 \cdot 10^{-18}$ м² и соответственно размеры частиц шлама $S_i = S_0(i+1)$. Частицы шлама подчиняются распределению Пуассона $P(i, \nu)$ по площадям поверхности с параметром $\nu = E_p/E_{cl} = 1$ и имеют размеры $d_1(i) \approx [S_i/\pi]^{1/2} \approx 4,2; 6,0; 7,3; 8,4; 9,4$ нм и наиболее вероятный размер $a_v = 5,8$ нм.

Концентрация частиц шлама на обрабатываемой поверхности N (1/м²с) определяется по формуле:

$$N = \frac{\omega_{123}}{4\pi^3 l_0^2} v e^{-v}. \quad (2)$$

Число i -тых частиц шлама на площади S_c за время контакта алмазного зерна с обрабатываемой поверхностью $t_c = d_d/u$ с учетом их распределения по площадям поверхности определяется по формуле $N(i) = N \cdot P(i, \nu) \cdot S_c \cdot t_c$. Толщина зазора l_0 между поверхностями инструмента и детали, заполненного водной суспензией алмазных микропорошков, принималась равной 2 мкм.

С учетом значения статической диэлектрической постоянной алмаза 5,68 [11] были рассчитаны значение константы Лифшица – $0,9 \cdot 10^{-21}$ Дж (5,9 мэВ) на частоте $\omega_{123} = 8,9 \cdot 10^{12}$ с⁻¹ и концентрация частиц шлама $N = 6,6 \cdot 10^{21}$ м⁻²с⁻¹.

При решении численными методами n уравнений (1) определены значения безразмерного параметра $\theta = 72,5$, коэффициентов объемного $\eta = 2,3 \cdot 10^{-11}$ м²/с и массового $\xi_m = 9,2 \cdot 10^{-8}$ кг/(м·с) износа, а также производительность полирования $Q = \eta \cdot L_i$ сапфира при данных условиях, которая составляет $5,7 \cdot 10^{-12}$ м³/с и практически совпадает с экспериментальным значением $5,9 \cdot 10^{-12}$ м³/с (линейный съем – 1,4 мг/мин. или 0,2 мкм/мин.).

Выводы. Таким образом, с помощью описанной обобщенной модели образования и удаления частиц шлама и съема обрабатываемого материала показано, что процесс алмазного полирования подложек из сапфира характеризуется величиной съема обрабатываемого материала порядка 0,2 мкм/мин., которая практически совпадает с данными экс-

перимента (погрешность расчета порядка 3 %) и является приемлемой с точки зрения эффективности обработки поверхностей оптоэлектронных деталей на операции предварительного полирования.

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. : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2004. – 166 с.
3. Філатов Ю.Д. Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком / Ю.Д. Філатов // Сверхтв. материалы. – № 1. – 2008. – С. 59–66.
4. Філатов Ю.Д. Моделювання процесів механічної обробки матеріалів : навч. посібник / Ю.Д. Філатов. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 176 с.
5. Філатов Ю.Д. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании / Ю.Д. Філатов, В.И. Сидорко // Сверхтв. материалы. – 2005. – № 1. – С. 58–66.
6. Філатов Ю.Д. Теоретические основы финишной обработки высококачественных прецизионных оптических поверхностей / Ю.Д. Філатов // Сб. Междунар. Академии КОНТЕНАНТ (декаб., 2009). – С. 19–30.
7. Ковальов С.В. Підвищення ефективності фінішної обробки складнопрофільних поверхонь деталей з природного каменю : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / С.В. Ковальов. – К., 2011. – 20 с.
8. Філатов О.Ю. Підвищення ефективності фінішної алмазно-абразивної обробки оптичного скла і природного каменю за умов активного контролю якості : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Ю.Д. Філатов. – К., 2012. – 20 с.
9. Електронний ресурс. – Режим доступу : macrooptica.org/sapfir.html
10. Инфракрасные спектры пропускания фотолюминесцентных пленок оксидов с Si-, Ge-квантовыми точками, сформированных импульсным лазерным осаждением / И.П. Лисовский, С.А.

Злобин, Э.Б. Каганович та ін. // Физика и техника полупроводника. – 2008. – Т. 42. – Вып. 5. – С. 560–565.

11. Физические свойства алмаза : справочник / под ред. *Н.В. Новикова*. – К. : Наукова думка, 1987. – 190 с.

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

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

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

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

Научные интересы:

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

Тел.: (044)430–05–39.

E-mail: filatov@ism.kiev.ua

Статья поступила в редакцию

Філатов Ю.Д., Ковальов С.В., Філатов О.Ю., Ветров А.Г. Полірування оптоелектронних деталей із сапфіру за допомогою алмазних мікропорошків

Филатов Ю.Д., Ковалев С.В., Филатов А.Ю., Ветров А.Г. Полирование оптоэлектронных деталей из сапфира с помощью алмазных микропорошков

Filatov Y.D., Kovalev S.V., Filatov A.Y., Vetrov A.G. Polishing of details of optoelectronics From sapphire BY MEANS OF the diamond Micropowders

УДК 621.9

Полірування оптоелектронних деталей із сапфіру за допомогою алмазних мікропорошків / Ю.Д. Філатов, С.В. Ковальов, О.Ю. Філатов, А.Г. Ветров

Наведені результати дослідження закономірностей алмазного полірування оптоелектронних деталей із сапфіру. Застосування узагальненої моделі утворення та видалення частинок шламу дозволило розрахувати величину зняття оброблюваного матеріалу, що практично збігається з експериментальними даними.

Ключевые слова: алмазное полирование, оптоэлектронные детали, частицы шлама.

УДК 621.9

Polishing of details of optoelectronics from sapphire by means of the diamond micropowders / Y.D. Filatov, S.V. Kovalev, A.Y. Filatov, A.G. Vetrov

Results of research of laws of diamond polishing of details of optoelectronics from sapphire are resulted. Application of the generalised model of formation and removal of particles slime has allowed to calculate size of productivity of the processing, practically coinciding with experimental data.

Ключевые слова: алмазное полирование, оптоэлектронные детали, частицы шлама.