

Дослідження процесів обробки

УДК 621.923.7

Ю. Д. Філатов

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

filatov2045@gmail.com

Квантовий механізм полірування оптичного скла

В результаті дослідження механізму полірування оптичного скла за допомогою дисперсних систем з порошків двооксиду церію встановлено, що знімання скла відбувається шляхом видалення наночастинок шламу з оброблюваної поверхні під час її взаємодії з частинками полірувального порошку, яка відбувається у відкритому мікрорезонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку, внаслідок ферстерівського резонансного перенесення енергії між енергетичними рівнями частинок полірувального порошку і оброблюваного матеріалу. Показано, що в двошмодовій системі з дискретним спектром власних частот, кількість наночастинок шламу, які генеруються в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира, зростає за збільшення коефіцієнта об'ємного зносу, часу життя збудженого стану кластерів оброблюваної поверхні і добротності мікрорезонатора. Розроблено методику розрахунку швидкості знімання оброблюваного матеріалу та параметрів шорсткості полірованих поверхонь і встановлено, що відхилення розрахованої продуктивності полірування від даних експерименту не перевищує 2 %, похибки розрахунку середнього арифметичного R_a і середнього квадратичного R_q відхилення профілю полірованої поверхні складають 10 %, а розрахункові значення найбільшої висоти профілю R_{max} є заниженим в порівнянні з експериментальними даними на 40–50 %.

Ключові слова: полірування, оптичне скло, ферстерівське резонансне перенесення енергії, швидкість знімання матеріалу, шорсткість полірованої поверхні.

ВСТУП

Процес полірування оптичних поверхонь деталей зі скла є однією з найдревніших нанотехнологій обробки матеріалів, яка дозволяє отримати поверхні з надзвичайно точною геометричною формою і шорсткістю, що характеризуються нанорозмірними параметрами, в результаті механічної

взаємодії макроскопічних твердих тіл з дисперсною системою полірувальних мікропорошків. Аналізу механізму полірування оптичного скла та дослідженню закономірностей видалення оброблюваного матеріалу і формування їхнього нанорельєфу присвячено значну кількість публікацій [1–9]. Зазвичай, полірування прецизійних поверхонь деталей з оптичного скла здійснюють за допомогою полірувальних дисперсних систем [1, 6, 8, 10–13] або інструментів зі зв'язаним абразивом типу Аквапол [6, 8, 14–16], що складаються з порошків двооксиду церію. Швидкість знімання оброблюваного матеріалу і параметри шорсткості обробленої поверхні під час полірування залежать від фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу, притира і полірувальної дисперсної системи, режимних і кінематичних параметрів процесу обробки тощо, і визначаються розмірами частинок шламу, які видаляються з оброблюваної поверхні. Однак, до теперішнього часу механізм утворення і видалення частинок шламу з оброблюваної поверхні остаточно не з'ясовано, а закономірності перенесення енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні під час полірування вивчено недостатньо. Саме тому дослідження механізму полірування оптичного скла за допомогою дисперсних систем з порошків двооксиду церію є актуальним.

Метою роботи є дослідження квантового механізму полірування оптичного скла за допомогою дисперсних систем з порошків двооксиду церію та розробка методики теоретичного розрахунку швидкості знімання оброблюваного матеріалу та параметрів шорсткості полірованих поверхонь.

МЕХАНІЗМ ЗНЯТТЯ ОБРОБЛЮВАНОВОГО МАТЕРІАЛУ ПІД ЧАС ПОЛІРУВАННЯ ОПТИЧНОГО СКЛА

Сучасна теорія полірування оптичного скла базується на кластерній моделі видалення оброблюваного матеріалу і формування мікро- і нанорельєфу полірованої поверхні [6, 8, 17–19], фізико-статистичній моделі утворення та видалення частинок шламу оброблюваного матеріалу [8, 20] і теорії Дерягіна–Ландау–Фервея–Овербека [7, 8, 21–23], згідно з якими нанохарактеристики процесу полірування – швидкість знімання оброблюваного матеріалу, яка вимірюється одиницями нм/с, та параметри шорсткості полірованих поверхонь, значення яких не перевищують 10 нм, визначаються макроскопічними технологічними параметрами процесу обробки (силою притискання інструмента до оброблюваної деталі, відносною швидкістю їхнього взаємного переміщення, часом полірування) та конструктивними характеристиками деталі й інструмента (розмірами, номінальною площею контакту тощо), а також фізико-хімічними властивостями оброблюваного матеріалу й інструмента, реологічними характеристиками полірувальної дисперсної системи та спектроскопічними характеристиками контактуючих тіл. Знімання оброблюваного матеріалу з поверхні скла відбувається шляхом утворення і видалення частинок шламу, яке є наслідком резонансного збільшення енергії кластерів, їхнього переходу зі зв'язаного стану у вільний стан під час механо-хімічних реакцій, що включають гідроксилування поверхні за рахунок гідролізу і вилугування, утворення і розриву деформованих зв'язків $\text{Si}\dots\text{O}\dots\text{Si}$ та утворення силієнових ($=\text{Si}:$) та радикальних центрів E^1 ($\equiv \text{Si}^\bullet$) і O° ($\equiv \text{SiO}^\bullet$), на поверхні частинки шламу і на новоутвореній поверхні скла відповідно.

Взаємодія поверхонь оброблюваної деталі та частинок полірувального порошку під час полірування визначається силами міжмолекулярної взаємодії Ван-дер-Ваальса, які є наслідком виникнення локальних дипольних моментів на частотах, характерних для спектрів інфрачервоного поглинання оброблю-

ваного матеріалу і полірувального порошку. Потенціал взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею визначається формулою [8, 24]

$$W = -\frac{A}{8\pi d_p} \int_0^{d_p} \left[\frac{d_p}{2x} + \frac{d_p}{2(x+d_p)} + \ln \left(\frac{x}{x+d_p} \right) \right] dx, \quad (1)$$

де $A = \hbar(\omega_2 - \omega_1)E$ – стала Ліфшиця; $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка; ω_1, ω_2 – частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів на оброблюваній поверхні та на поверхні частинки полірувального порошку; $E = \frac{[\varepsilon_1 - \varepsilon_3][\varepsilon_2 - \varepsilon_3]}{[\varepsilon_1 + \varepsilon_3][\varepsilon_2 + \varepsilon_3]}$ – функція діелектричних проникностей; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – статичні

діелектричні проникності оброблюваного матеріалу, полірувального порошку та дисперсного середовища дисперсної системи; d_p – розмір частинки полірувального порошку; x – відстань між частинкою і поверхнею [6, 8, 25, 26].

Концентрація частинок шламу, яка залежить від потенціалу W взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею і нормованих функцій розподілу Пуассона частинок шламу за площами поверхні $P(n, v)$, визначається у відповідності до формули [6, 8, 27]

$$N_s(n) = \frac{2W}{\pi \hbar S_c} P(n, v), \quad (2)$$

де S_c – площа контакту поверхонь інструмента (притира) і деталі; v – параметр розподілу.

Коефіцієнт об'ємного зносу оброблюваної поверхні, який залежить від розмірів частинок шламу $d(n)$ і їхньої площі поверхні $S(n)$, визначається у відповідності до формули $\eta = \sum_n \frac{d(n)^2}{4\beta(n)t_c}$, в якій $\beta(n)$ є розв'язками трансцендентного рівняння [8, 20, 27]

$$\frac{\exp(-\beta(n)^2)}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\beta(n))} = \frac{1}{N_s(n) S(n)} \sqrt{L_t d_p S_c} \vartheta,$$

де L_t – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку вздовж оброблюваної поверхні; $\vartheta = \frac{\lambda T L_t}{p_a u S_c}$ – безрозмірний параметр; λ – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу; T – середня температура в зоні контакту оброблюваної деталі та притира; p_a – тиск притискання деталі до притира; $t_c = d_p/u$ – час контакту частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею; u – швидкість відносного переміщення деталі і притира.

Під час взаємодії частинок полірувального порошку з поверхнею оброблюваної деталі між ними відбувається обмін енергією, механізм якого такий же, як у разі взаємодії складових частин гібридних наносистем (кластерів, квантових точок, нитковидних нанокристалів тощо), який передбачає перенесення енергії збудженого стану донора до акцептора в результаті диполь-дипольної взаємодії між ними і відбувається без проміжного випромінювання фотонів (ферстерівське резонансне перенесення енергії, FRET) [27–30]. Знімання оброблюваного матеріалу з поверхні скла відбувається через видалення частинок шламу, яке є наслідком FRET [31–33] між частинками дисперсної

фази полірувальної дисперсної системи і оброблюваною поверхнею. Оскільки форма поверхні деталі зі скла і поверхні притира практично збігаються за рівного за абсолютною величиною і протилежного за знаком радіусу кривини, можна вважати, що FRET від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні відбувається у відкритому резонаторі, який утворюється цими поверхнями, що уможлиблює реверсування FRET (ефект карнавала [34–36]), коли донор і акцептор міняються місцями. Можливе також FRET, за якого молекулярні фрагменти частинок дисперсної фази та оброблюваної поверхні є одночасно і донорами, і акцепторами [37–39].

В системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира на відміну від FRET лазерів [40–44], які генерують фотони, відбувається генерація квантових частинок – наночастинок шламу, наночастинок зносу полірувального порошку і наночастинок зносу притира, що утворюються в околі поверхні скла і поверхні притира відповідно, рухаються вздовж вісі резонатора, який утворено оброблюваною поверхнею і поверхнею притира, і характеризуються відповідними частотами. Від потужності генерації наночастинок шламу, яка визначається добротністю мікрорезонатора, утвореного поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку, $Q = \omega_1/(\omega_2 - \omega_1)$ [41, 45, 46], суттєво залежить швидкість v знімання оброблюваного матеріалу, яка визначається у відповідності до формули [27, 37]

$$v = \eta L_t \frac{\tau}{t_c} Q, \quad (3)$$

де η – коефіцієнт об’ємного зносу [8, 20, 27]; τ – час життя кластерів оброблюваної поверхні у збудженому стані.

Під час взаємодії частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею на ній збуджуються кластери за рахунок коливальної енергії збуджених кластерів на поверхні полірувальних частинок, а перенесення енергії від дисперсної системи до оброблюваної поверхні відбуваються за умови $\omega_2 > \omega_1$ [27]. Співвідношення цих частот визначають кількість молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваної поверхні $\xi_1 = \omega_1^4/(\omega_2^2 - \omega_1^2)^2$ і полірувального порошку $\xi_2 = \omega_2^4/(\omega_2^2 - \omega_1^2)^2$ та енергію кластерів оброблюваної поверхні $E_{k01} = \hbar\omega_1\xi_1$ та частинки полірувального порошку $E_{k02} = \hbar\omega_2\xi_2$. Частинки шламу оброблюваного матеріалу утворюються тільки тоді, коли енергія відповідних кластерів перевищує значення енергії зв’язку E_b оброблюваного матеріалу. В процесі перенесення енергії від кластерів частинок полірувального порошку до кластерів оброблюваної поверхні, яке відбувається під час переходів між “безперервними” смугами енергетичних рівнів, що утворюються з величезної кількості близько розташованих станів енергії кластерів, їхня енергія може набувати дискретних значень

$$E_1(n) = 2\mu E_{k01} \left(n + \frac{1}{2} \right) \text{ і } E_2(n) = 2\mu E_{k02} \left(n + \frac{1}{2} \right),$$

де $\mu = \frac{E_{b1}}{E_1(0)}$ – нормований коефіцієнт; $n = \overline{0, N-1}$ і N – номери та кількість

смуг.

Ймовірність утворення частинок шламу описується функцією розподілу

Пуассона за площами їхньої поверхні $P(n, v) = \frac{e^{-v} v^n}{n!} = \frac{1}{en!}$ (параметр розпо-

ділу $v = 1$), їхні найбільш ймовірні розмір $a_v = \sum_n d(n)P(n, v)$, площа поверхні $S_v = \sum_n S(n)P(n, v)$ і об'єм $V_v = \frac{\pi}{6} \sum_n d^3(n)P(n, v)$ залежать від кількості молекулярних фрагментів ξ_1 , а енергія визначається у відповідності до формули $\Delta E = \sum_{n=0}^{N_1-1} \left[E_{k02} \left(n + \frac{1}{2} \right) - E_{k01}(0) \right] - E_b$. Водночас кількість N_1 квантових рівнів частинок шламу, що мають однакову енергію визначається як розв'язок трансцендентного рівняння $\Delta E = (E_{k02} - E_{k01}) \sum_{n=0}^{N_1-1} \left(n + \frac{1}{2} \right) - E_b$.

Час життя збудженого стану кластерів оброблюваної поверхні визначається як величина, обернена ймовірності квантових переходів зі збудженого стану кластерів частинок полірувального порошку у всі стани з меншою енергією, яка пропорційна частоті ω_2 і визначається формулою

$$w_{mn} = 4\alpha^3 \omega_2 / 3,$$

де $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$ – стала тонкої структури; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд електрона, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла [27], що дозволяє визначити час життя кластерів оброблюваної поверхні у збудженому стані у відповідності до формули

$$\tau = \frac{3N_m}{4\alpha^3 \omega_2}, \quad (4)$$

де N_m – кількість можливих переходів.

Кількість можливих переходів між квантовими рівнями енергії кластерів частинки полірувального порошку та оброблюваної поверхні у відповідності до теорії молекулярних коливань залежить від кількості рівнів та їх виродження і визначається у відповідності до формули

$$N_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{N}{N_1} \cdot k_m,$$

де $k_m = \prod_{n=1}^f \frac{(n+g-1)!}{n!(g-1)!} = 6$ – кратність виродження рівнів; $f = 2$ – кількість

ступенів вільності коливального руху кластерів оброблюваної поверхні; $g = 2$ – кількість нормальних коливань кластерів оброблюваної поверхні.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Полірування плоских поверхонь деталей з оптичного скла марки К8 діаметром 60 мм здійснювали на шліфувально-полірувальному верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притира з пінополіуретану діаметром 100 мм і полірувальної дисперсної системи – водяної суспензії двооксиду церію за зусилля притискання деталі до притира 50 Н, частоти обертання притира 90 об/хв, зміщення штриха 30 мм та довжини штриха 80 мм, середньої температури в зоні контакту оброблюваної деталі та притира $T = 298$ К.

Фізико-хімічні властивості оптичного скла марки К8 (аналог BK7 Schott optical glass) наведено в табл. 1, 2 [3, 6, 8, 24, 47–49]. Значення енергії зв'язку скла марки К8 визначали у відповідності до формули

$$E_b = \frac{\sum_k \alpha_k E_k}{100},$$

де E_k – енергія одиничного зв'язку Me–O в Me_xO_y ; α_k – вміст Me_xO_y , і складала приблизно 90 ккал/моль (3,9 еВ). Статичну діелектричну проникність скла визначали за формулою

$$\varepsilon = \frac{\sum_k \alpha_k \varepsilon_k}{100},$$

де ε_k – коефіцієнти визначені за умов: температура 20 °С, частота 0,45 ГГц, і складала $\varepsilon_1 = 6,5$ (табл. 1, 2).

Таблиця 1. Хімічний склад оптичного скла та коефіцієнти для розрахунку енергії зв'язку та діелектричної проникності

Оксид	SiO ₂	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	BaO
Вміст, % (за масою)	69,10	10,75	10,40	6,30	3,10
E_k , ккал/моль	106	119	20	13	33
ε_k	3,8	3,8	17,6	16,0	20,5

Таблиця 2. Фізичні властивості оптичного скла

Густина, г/см ³	Енергія зв'язку E_b , еВ	Статична діелектрична проникність ε_1	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Питома теплоємність c_p , Дж/(кг·К)	Коефіцієнт температуро-провідності $\chi \cdot 10^6$, м ² /с
2,52	3,9	6,5	0,95	754	0,50

В якості дисперсної фази полірувальної дисперсної системи використовували полірувальні порошки на основі двооксиду церію “FR-Remillox” фірми “Fujiimi”, СЕМ зображення (сканувальний мікроскоп-аналізатор Camscan-4DV) яких представлено на рис. 1. Фізико-хімічні властивості полірувального порошку наведено в табл. 3 [6, 10, 50–53].

Частоти власних коливань молекулярних фрагментів частинок полірувального порошку двооксиду церію, визначені за спектрами ІЧ-поглинання (Фур'є-спектрометр Nicolet 6700), складала 600,22, 668,39, 867,23, 951,61, 1073,25 см⁻¹, а частоти власних коливань молекулярних фрагментів оптичного скла марки К8 складала 667,73, 781,28, 855,03, 935,67 см⁻¹.

Таблиця 3. Фізико-хімічні властивості полірувального порошку

Густина, г/см ³	Статична діелектрична проникність ε_2	Середній розмір частинок d_p , мкм	Розподіл частинок за розмірами, %
6,26	21,2	0,91	< 1 мкм – 82, 1–2 мкм – 8, 2–3 мкм – 5, 3–5 мкм – 3, 5–7 мкм – 2.

Довжина шляху тертя частинки полірувального порошку вздовж оброблюваної поверхні і швидкість відносного переміщення деталі та притира, усереднені за кінематичними параметрами налагодження верстату (зміщення та довжини штриха), склали відповідно $L_t = 188$ мм і $u = 0,47$ м/с. Час контакту частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею складав $t_c = 1,95$ мкс. Знімання оброблюваного матеріалу визначали ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. ВЛР-200 в мг/30 хв. Параметри шорсткості полірованих поверхонь деталей з оптичного скла визначали методом комп'ютерного моделювання [6, 19, 26, 38, 54] та контролювали за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографа Micron-alpha і атомного силового мікроскопа NanoScope IIIa. Підготовку плоских поверхонь оптичних деталей під полірування здійснювали за допомогою традиційних методів алмазного шліфування [6, 37, 55].

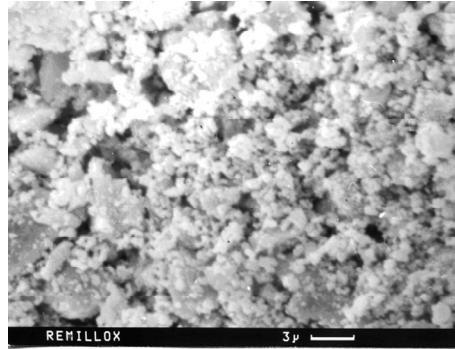


Рис. 1. Полірувальний порошок двооксиду церію “FR-Remillox”.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження механізму утворення наночастинок шламу під час полірування оптичного скла марки К8 за допомогою дисперсної системи з мікропорошків двооксиду церію здійснювали з врахуванням того, що резонансне перенесення енергії від дисперсної системи до оброблюваного матеріалу відбувається в двохмодовому режимі під час квантових переходів між енергетичними рівнями на частотах: $\nu_{23} = 951,61$ $\text{cm}^{-1} \rightarrow \nu_{13} = 935,67$ cm^{-1} і $\nu_{22} = 867,23$ $\text{cm}^{-1} \rightarrow \nu_{12} = 855,03$ cm^{-1} (рис. 2).

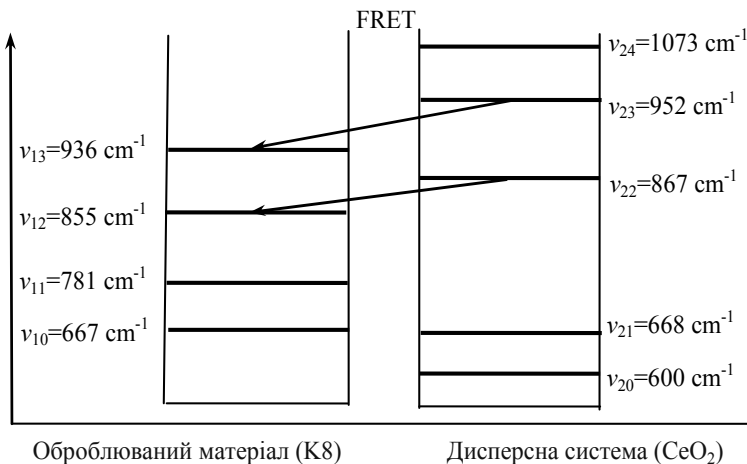


Рис. 2. Перенесення енергії між частинкою полірувального порошку і поверхнею оброблюваного матеріалу під час полірування оптичного скла.

Теоретично розраховані значення параметрів взаємодії оброблюваної поверхні деталі зі скла марки К8 з частинками полірувального порошку з двооксиду церію: потенціал взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею W (формула (1)), концентрація частинок шламу N_s (формула

(2)), коефіцієнт об'ємного зносу η , добротність мікрорезонатора Q , кількість можливих переходів N_m , час життя кластерів оброблюваної поверхні у збудженому стані τ (формула (4)), а також результати розрахунку швидкості знімання оброблюваного матеріалу (формула (3)) і параметрів шорсткості полірованої поверхні та їхнього експериментального визначення наведено в табл. 4 і 5.

Таблиця 4. Параметри полірування оптичного скла марки К8

Параметр	Переходи FRET	
	$V_{22} \rightarrow V_{12}$	$V_{23} \rightarrow V_{13}$
Частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів		
$\omega_1 \cdot 10^{-14}, \text{с}^{-1}$,	1,612	1,764
$\omega_2 \cdot 10^{-14}, \text{с}^{-1}$	1,635	1,794
Добротність мікрорезонатора Q	70,1	58,7
Кількість молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваної поверхні й полірувального порошку (ξ_1 / ξ_2)	1211 / 1281	846 / 906
Нормований коефіцієнт μ	0,03	0,04
Кількість смуг енергетичних рівнів N	1	1
Кількість квантових рівнів частинок шламу, що мають однакову енергію N_1	4	4
Кількість можливих переходів N_m	49	37
Час життя кластерів оброблюваної поверхні у збудженому стані τ , нс	578	398
Стала Ліфшиця A , меВ	0,69	0,90
Потенціал взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею W , меВ	0,09	0,11
Концентрація частинок шламу $N_s, 10^{14} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	0,11	0,14
Найбільш ймовірні значення:		
Розмір частинок шламу a_s , нм,	7,0	6,2
Площа поверхні S_s , нм^2	152,2	121,4
Об'єм V_s , нм^3	176,5	125,7
Коефіцієнт об'ємного зносу $\eta, 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$	1,85	1,46
Швидкість знімання оброблюваного матеріалу $v \cdot 10^{13}, \text{ м}^3/\text{с}$	72,52	32,94
Сумарне значення ($v_s = v_1 + v_2$) $\cdot 10^{-13}, \text{ м}^3/\text{с}$	105,5	
Параметри шорсткості полірованої поверхні, нм		
Ra_i	8,5±0,3	7,9±0,5
Rq_i	8,9±0,3	8,4±0,5
$Rmax_i$	14,4±2,1	13,7±2,1

Швидкість знімання оброблюваного матеріалу v під час процесу полірування оптичного скла марки К8 за допомогою дисперсної системи з двооксиду церію, який відбувався у відкритому мікрорезонаторі, для двокомодової системи з дискретним спектром власних частот розраховували за формулою (3), в якій коефіцієнт об'ємного зносу $\eta_R = \eta_1 + \eta_2 = 3,3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$, час життя кластерів оброблюваної поверхні у збудженому стані $\tau_R = \tau_1 + \tau_2 = 976 \text{ нс}$, добротність мікрорезонатора $Q_R = [Q_1^{-1} + Q_2^{-1}]^{-1} = 31,9$. Показано, що під час полірування скла швидкість знімання оброблюваного матеріалу в двокомодовому режимі складає $v_R = 99,8 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$, що на 5–6 % менше сумарного значення v_s . Теоре-

тично визначене значення швидкості знімання оброблюваного матеріалу під час полірування скла марки К8 добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування – $12,5 \pm 0,4$ мкм/год або $(98,1 \pm 3,3) \cdot 10^{-13}$ м³/с (табл. 5) за відхилення 2 %.

Таблиця 5. Показники полірування оптичного скла марки К8

Швидкість знімання оброблюваного матеріалу	
v_R , м ³ /с	$99,8 \cdot 10^{-13}$
Експеримент: мкм/год	$12,5 \pm 0,4$
м ³ /с	$(98,1 \pm 3,3) \cdot 10^{-13}$
Похибка розрахунку, %	2
Параметри шорсткості полірованої поверхні, нм	
Ra	$8,2 \pm 0,4$
Rq	$8,6 \pm 0,4$
$Rmax$	$14,0 \pm 2,1$
Експеримент	$Ra = 8,9$ нм, $Rq = 9,5$ нм, $Rmax = 20,4$ нм
	$Ra = 7,4$ нм, $Rq = 7,8$ нм, $Rmax = 24,0$ нм

Параметри шорсткості полірованої поверхні (середнє арифметичне Ra і середнє квадратичне Rq відхилення профілю, найбільша висота профілю $Rmax$), які визначали за допомогою методу комп'ютерного моделювання [26, 54], залежать від розміру і концентрації наночастинок шламу, а також нормованих функцій розподілу Пуассона частинок шламу за площами поверхні $P(n, \nu)$ та пропорційно збільшуються у разі підвищення добротності мікро-резонатора, утвореного поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку [38]. В результаті FRET від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні, який відбувається в процесі переходу між енергетичними рівнями $\nu_{22} \rightarrow \nu_{12}$ і $\nu_{23} \rightarrow \nu_{13}$, що характерні для двохмодового режиму ($i = 1, 2$ – номер моди), утворюються наночастинки шламу розмірами $d(n)$, внаслідок видалення з оброблюваної поверхні яких її шорсткість характеризується параметрами Ra_i , Rq_i і $Rmax_i$ (табл. 4). Результуюча шорсткість полірованої поверхні визначається параметрами $Ra = (Ra_1 N_{s1} + Ra_2 N_{s2}) / (N_{s1} + N_{s2}) = 8,2$ нм, $Rq = (Rq_1 N_{s1} + Rq_2 N_{s2}) / (N_{s1} + N_{s2}) = 8,6$ нм і $Rmax = (Rmax_1 N_{s1} + Rmax_2 N_{s2}) / (N_{s1} + N_{s2}) = 14$ нм, а похибки їхнього визначення складають 0,4, 0,4 і 2,1 нм відповідно. Отже, теоретично розраховані параметри шорсткості полірованих поверхонь оптичних деталей зі скла марки К8 складають: $Ra = 8,2 \pm 0,4$ нм, $Rq = 8,6 \pm 0,4$ нм і $Rmax = 14,0 \pm 2,1$ нм (табл. 5).

Після експериментальної оцінки шорсткості обробленої поверхні деталі з оптичного скла марки К8 за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографу Micron-alpha (рис. 3) було отримано наступні значення параметрів шорсткості (усереднені за 10 вимірами): $Ra = 8,9$ нм, $Rq = 9,5$ нм, $Rmax = 20,4$ нм (табл. 5). Параметри шорсткості оброблених поверхонь деталей з оптичного скла визначали також за профілограмами, які реєстрували за допомогою атомного силового мікроскопа NanoScope IIIa (рис. 4). В результаті аналізу профілограм отримано такі значення параметрів шорсткості (усереднені за шістьма вимірами): $Ra = 7,4$ нм, $Rq = 7,8$ нм, $Rmax = 24$ нм (табл. 5).

Середнє значення відхилення результатів розрахунку середнього арифметичного Ra і середнього квадратичного Rq відхилення профілю полірованої поверхні скла марки К8 від експериментально визначених значень складало

~ 10 %, а розраховане значення найбільшої висоти профілю R_{max} – занижене на 40–50 % в порівнянні з експериментальними даними, що пояснюється значно меншими (50–100 нм) значеннями базової довжини профілограми, для яких можливо застосування методу комп’ютерного моделювання [6, 54].

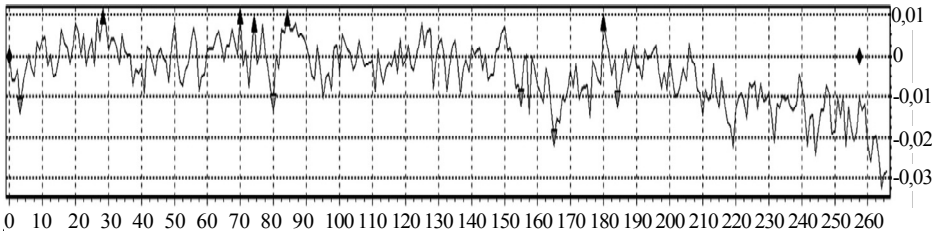


Рис. 3. Параметри шорсткості полірованої поверхні: зразок 1, кут – 0, $R_a = 0,00887$, $R_q = 0,00948$, $R_{max} = 0,02042$.

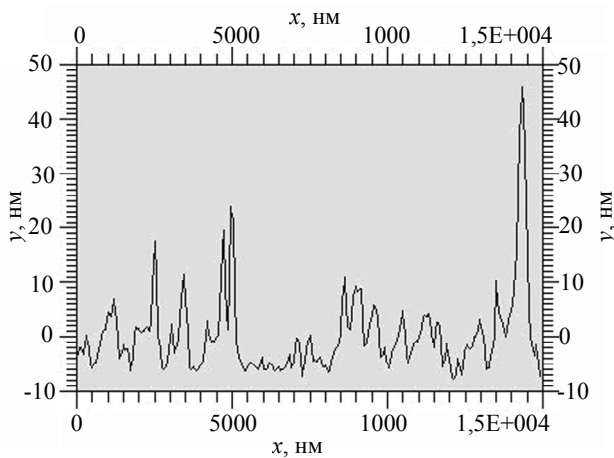


Рис. 4. Профілограма полірованої поверхні скла марки К8.

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження механізму полірування оптичного скла за допомогою дисперсних систем з порошків двооксиду церію встановлено, що знімання оброблюваного матеріалу відбувається через утворення і видалення наночастинок шламу під час міжмолекулярної взаємодії між частинками полірувального порошку і оброблюваною поверхнею, яке відбувається у відкритому резонаторі, утвореному поверхнями оброблюваної деталі і притира, і є наслідком резонансного перенесення енергії між енергетичними рівнями частинок полірувального порошку і оброблюваного матеріалу за ферстерівським механізмом.

Під час FRET, яке відбувається в двохмодовій системі з дискретним спектром власних частот, кількість наночастинок шламу, які генеруються в мікрорезонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку, зростає за збільшення коефіцієнта об’ємного зносу, часу життя збудженого стану кластерів оброблюваної поверхні і добротності мікрорезонатора.

За допомогою розробленої методики теоретичного розрахунку швидкості знімання оброблюваного матеріалу та параметрів шорсткості полірованих поверхонь встановлено, що відхилення результатів розрахунку продуктивно-

сті полірування від даних експерименту не перевищує 2 %, похибки розрахунку середнього арифметичного Ra і середнього квадратичного Rq відхилення профілю полірованої поверхні складають ~ 10 %, а розраховане значення найбільшої висоти профілю R_{max} є на 40–50 % заниженим в порівнянні з експериментальними даними.

ФІНАНСУВАННЯ

Дану роботу не було профінансовано із зовнішніх джерел.

Yu. D. Filatov

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Quantum mechanism of optical glass polishing

As a result of research into the mechanism of optical glass polishing with the help of dispersed systems of cerium dioxide powders, it was established that glass removal occurs by removing sludge nanoparticles from the treated surface during its interaction with polishing powder particles, which occurs in an open microresonator formed by the surfaces of the processed material and polishing powder particles, as a result of the Förster resonance transfer of energy between the energy levels of the particles of the polishing powder and the processed material. It is shown that in a two-mode system with a discrete spectrum of natural frequencies, the number of sludge nanoparticles generated in the system processed surface–dispersion system–lapping surface increases due to an increase in the volume wear coefficient, the lifetime of the excited state of the clusters of the processed surface and Q -value of the microresonator. A method of calculating the speed of removal of the processed material and roughness parameters of polished surfaces was developed and it was established that the deviation of the calculated polishing performance from the experimental data does not exceed 2%, the errors of calculating the arithmetic mean Ra and the mean square Rq of the deviation of the profile of the polished surface are 10%, and the calculated value of the highest profile height R_{max} is underestimated in comparison with the experimental data by 40–50 %.

Keywords: polishing, optical glass, Förster resonance transfer of energy, material removal rate, surface roughness.

1. Landis A.C. Factors Influencing Material Removal and Surface Finish of The Polishing of Silica Glasses. The University of North Carolina, Charlotte, 2006. 106 p.
2. Desai J.N. Advances and processes in Precision Glass Polishing Techniques. *University of Florida*, 2009. P. 1–12.
3. Belkhir N., Aliouane T., Bouzid D. Correlation between contact surface and friction during the optical glass polishing. *Appl. Surf. Sci.* 2014. Vol. 288. P. 208–214.
4. Suratwala T., Steele W., Feit M., Shen N., Dylla-Spears R., Wong L., Elhadj S. Mechanism and simulation of removal rate and surface roughness during optical polishing of glasses. *J. Am. Ceram. Soc.* 2016. Vol. 99, no. 6. P. 1974–1984.
5. Mounir H., Hamdi A., Aliouane T., Bouzid D. Study of the pressure distribution during the optical glass polishing. *Recueil de mécanique (RDM)*. 2017. Vol. 2, no. 001. P. 136–143.
6. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Ковальов С.В. Фізичні засади формоутворення прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів. Київ: Наук. думка, 2017. 248 с.
7. Suratwala T.I. Materials Science and Technology of Optical Fabrication. USA, Hoboken: Wiley, 2018. 416 p.
8. Filatov Yu.D. Polishing of precision surfaces of optoelectronic device elements made of glass, siall, and optical and semiconductor crystals: A review. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 1. P. 30–48.
9. Pal R.K., Kumar M., Karar V. Experimental investigation of polishing process for Schott BK-7 optical glass. *Materials Today: Proc.* 2022. Vol. 57. Part 2. P. 734–738.
10. Bouzid D., Belkhir N., Aliouane T. Optical glass surfaces polishing by cerium oxide particles. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2012. Vol. 28. no. 012007. P. 1–6.

11. Peng W.Q., Guan C.L., Li S.Y. Material removal mechanism of ceria particles with different sizes in glass polishing. *Opt. Eng.* 2014. Vol. 53, no. 3. P. 035104.
12. Sreeremya T.S., Prabhakaran M., Ghosh S. Tailoring the surface properties of cerium oxide nanoabrasives through morphology control for glass CMP. *RSC Adv.* 2015. Vol. 5, no. 102. P. 84056–84065.
13. Janoš P., Ederer J., Pilařová V., Henych J., Tolasz J., Milde D., Opletal T. Chemical mechanical glass polishing with cerium oxide: Effect of selected physico-chemical characteristics on polishing efficiency. *Wear.* 2016. Vol. 362–363. P. 114–120.
14. Li Y., Wu Y. Hybrid polishing of fused silica glass with bound-abrasive polishers in conjunction with vibration. *Proc. SPIE.* 2012. Vol. 8486, art. 84860N.
15. Fu Y., Li Y. Glass polishing with bound-abrasive vibrating polishing tools. *J. Optoelectron. Adv. M.* 2014. Vol. 16, no. 1–2. P. 70–75.
16. Li Y. Recent progress in bound-abrasive polishing of fused silica glass. *Proc. SPIE.* 2015. Vol. 9633, art. 963327.
17. Filatov Yu.D., Rogov V.V. A cluster model of mechanism of silica-containing material fatigue wear in polishing. *Sverkhtverdye Materialy.* 1994. Part 1. no. 3. P. 40–43; Part 2. no. 4. P. 45–51.
18. Filatov Y.D. Mechanism of surface microrelief formation during glass treatment. *Sverkhtverdye Materialy.* 1991. no. 5. P. 61–65.
19. Filatov Yu.D. Polishing of aluminosilicate materials with tools with bound polishing powder. *Sverkhtverdye Materialy.* 2001. no. 3. P. 36–49.
20. Filatov Y.D., Sidorko V.I. Statistical approach to wear of nonmetallic workpiece surfaces in polishing. *Sverkhtverdye Materialy.* 2005. no. 1. P. 58–66.
21. Rami M.-L., Meireles M., Cabane B., Guizard Ch. Colloidal stability for concentrated zirconia aqueous suspensions. *J. Am. Ceram. Soc.* 2009. Vol. 92, is. 1. P. 550–556.
22. Valmacco V., Elzbieciak-Wodka M., Besnard C., Maroni P., Trefalt G., Borkovec M. Dispersion forces acting between silica particles across water: influence of nanoscale roughness. *Nanoscale Horiz.* 2016. Vol. 1. P. 325–330.
23. Sato N., Aoyama Y., Yamanaka J., Toyotama A., Okuzono T. Particle adsorption on hydrogel surfaces in aqueous media due to van der waals attraction. *Sci. Reports.* 2017. Vol. 7, art. 6099.
24. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Effect of interaction between polishing powder particles and a treated material on the polishing characteristics of optical surfaces. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 4. P. 296–302.
25. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Effect of the dielectric characteristics of a treated material, a polishing powder, and a disperse system on the energy of their interaction in the polishing of optical surfaces. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 4. P. 276–284.
26. Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Filatov Y.D., Vetrov A.G. Polishing substrates of single crystal silicon carbide and sapphire for optoelectronics. *Funct. Mater.* 2016. Vol. 23, no. 1. P. 104–110.
27. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Transfer energy in the interaction of an optical surface with a polishing disperse system. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 2. P. 117–126.
28. Wang Yu., Wang L.V. Forster resonance energy transfer photoacoustic microscopy. *J. Biomed. Optics.* 2012. Vol. 17, no. 8, art. 086007.
29. Jones G.A., Bradshaw D.S. Resonance energy transfer: from fundamental theory to receipt applications. *Front. Phys.* 2019. Vol. 7, no. 100. P. 1–19.
30. Singldinger A., Gramlich M., Gruber C. Lampe C., Urban A.S. Nonradiative energy transfer between thickness-controlled halide perovskite nanoplatelets. *ACS Energy Lett.* 2020. Vol. 5. P. 1380–1385.
31. Filatov Yu.D. Relationship between the transfer coefficients and transfer energy during the polishing of nonmetallic materials. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 3. P. 226–228.
32. Cortes C.L., Jacob Z. Fundamental figures of merit for engineering Förster resonance energy transfer. *Optics Express.* 2018. Vol. 26, no. 15. P. 19371–19387.
33. Gordon F., Elcoroaristizabal S., Ryder A.G. Modelling Förster resonance energy transfer (FRET) using anisotropy resolved multi-dimensional emission spectroscopy (ARMES). *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects.* 2021. Vol. 1865, no. 2. P. 129770.
34. Du M., Martinez-Martinez L.A., Ribeiro R.F., Hu Z., Menon V.M., Yuen-Zhou J. Theory for polariton-assisted remote energy transfer. *Chem. Sci.* 2018. Vol. 9. P. 6659–6669.

35. Dovzhenko D., Lednev M., Mochalov K. Vaskan I., Rakovich Yu., Nabiev I. Polariton-assisted manipulation of energy relaxation pathways: donor–acceptor role reversal in a tuneable microcavity. *Chem. Sci.* 2021. Vol. 12. P. 12794–12805.
36. Nabiev I. Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *PhysBioSymp 2019. J. Phys.: Conf. Series.* 2021. Vol. 2058, no. 1. P. 012001.
37. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Performance efficiency of the polishing of polymer optical materials. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 5. P. 358–367.
38. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Sokhan' S.V. Kovalev S.V., Boyarintsev A.Y., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Y. Roughness of polished surfaces of optoelectronic components made of polymeric optical materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 1. P. 54–64.
39. Filatov Y.D. New patterns of polishing surfaces of parts made of nonmetallic materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 2. P. 140–149.
40. Rivera J.A., Desai K.V., Eden J.G. Fluorophore-gold nanoparticle FRET/plasmonic lasers with the streptavidin-biotin complex as the acceptor–donor linkage. *AIP Advances.* 2021. Vol. 11, art. 125033.
41. Zheng L., Zhi M., Chan Y., Khan S.A. Multi-color lasing in chemically open droplet cavities. *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8, no. 1. P. 1–8.
42. Qiao C., Zhang C., Zhou Z., Yao J., Zhao Y.S. An optically reconfigurable forster resonance energy transfer process for broadband switchable organic single-mode microlasers. *CCS. Chemistry.* 2022. Vol. 4, no. 1. P. 250–258.
43. Chen Q., Kiraz A., Fan X. An optofluidic FRET laser using quantum dots as donor. *Frontiers in Biological Detection: From Nanosensors to Systems VIII. Proc. SPIE.* 2016. Vol. 9725, art. 97250I-1.
44. Saha J., Dey D., Roy A.D., Bhattacharjee D., Hussain S.A. Multi step FRET among three laser dyes Pyrene, Acriflavine and Rhodamine B. *J. Luminescence.* 2016. Vol. 172. P. 168–174.
45. Andrew P., Barnes W.L. Forster energy transfer in an optical microcavity. *Science.* 2000. Vol. 290, no. 5492. P. 785–788.
46. Aas M., Chen Q., Jona's A., Kiraz A., Fan X. Optofluidic FRET lasers and their applications in novel photonic devices and biochemical sensing. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2016. Vol. 22, no. 4, art. 7000215.
47. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Effect of the rheological properties of a dispersed system on the polishing indicators of optical glass and glass ceramics. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no 1. P. 65–73.
48. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y., Kovalev S.V., Garachenko V.V., Kovalev V.A. Effect of the spectroscopic parameters of the processed material and polishing powder on the parameters of polishing of optical surfaces. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no 1. P. 37–45.
49. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Effect of the processed material structure on the polishing quality of optical surfaces. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 6. P. 435–443.
50. Borisov A.V., Korolevych L.N., Maksimchuk N.V. Al/nanocrystalline CeO_x/Si/Al structures for heterojunction photodetectors. *Electron. Comm.* 2014. Vol. 19, no. 6(83). P. 9–13.
51. Murarka S.P., Eizenberg M., Sinha A.K. Interlayer Dielectrics for Semiconductor Technologies. Elsevier Academic Press, 2003. 444 p.
52. Zamiri R., Ahangar H.A., Kaushal A., Zakaria A., Zamiri G., Tobaldi D., Ferreira J.M.F. Dielectrical properties of CeO₂ nanoparticles at different temperatures. *PLoS ONE.* 2015. Vol. 10, no. 4. P. 1–11.
53. Prabaharana D.M.D.M., Sadaiyandib K., Mahendranc M., Sagadevand S. Structural, optical, morphological and dielectric properties of cerium oxide nanoparticles. *Mater. Res.* 2016. Vol. 19, no. 2. P. 478–482.
54. Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Filatov Yu.D., Vetrov A.G. Polished surface roughness of optoelectronic components made of monocrystalline materials. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 3. P. 197–206.
55. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.

Надійшла до редакції 10.09.23

Після доопрацювання 10.10.23

Прийнята до опублікування 26.10.23