

Дослідження процесів обробки

УДК 621.923.7

**Ю. Д. Філатов^{1,*}, Т. О. Пріхна¹, А. Ю. Бояринцев²,
В. І. Сідорко³, С. В. Ковальов¹**

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля
НАН України, м. Київ, Україна

²Інститут сцинтиляційних матеріалів
НАН України, м. Харків, Україна

³Державне підприємство “Інженерно-виробничий центр
АЛКОН” НТАК (АЛКОН) НАН України

*filatov2045@gmail.com

Механізм полірування деталей оптотехніки з алюмінію

В результаті дослідження закономірностей знімання оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю полірованої поверхні під час полірування деталей оптотехніки з алюмінію за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків метаборату міді встановлено, що утворення і видалення наночастинок шламу внаслідок передачі енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні, відбувається за механізмом QD-FRET – ферстерівського резонансного перенесення енергії, опосередкованого квантовими точками Al_2O_3 -QDs, які утворюються на поверхні алюмінію. Показано, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу під час полірування алюмінію за допомогою дисперсної системи на основі метаборату міді і гасу залежить від добротності мікрорезонатора, який утворено поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку, і часу життя збудженого стану квантових точок оброблюваної поверхні у відповідності до загальних закономірностей процесу полірування. Встановлено, що результати теоретичного розрахунку швидкості знімання оброблюваного матеріалу добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування алюмінію з відхиленням 1–5 %. Показано, що за рівнем продуктивності полірування і шорсткості полірованих поверхонь для полірування деталей оптотехніки з алюмінію доцільно використовувати дисперсну систему з мікро- і нанопорошків метаборату міді.

Ключові слова: полірування, квантові точки (КТ), ферстерівське резонансне перенесення енергії (FRET), швидкість знімання матеріалу (MRR), шорсткість поверхні, алюміній, метаборат міді.

ВСТУП

Полірування деталей оптотехніки з алюмінію і алюмінієвих сплавів, які широко використовуються в якості астрономічних інструментів для космічних і земних обсерваторій [1], високоефективних дзеркальних приладів видимого та ультрафіолетового діапазонів спектру [2], дзеркал для інфрачервоного діапазону, що працюють в криогенних умовах [3, 4], здійснюється за допомогою методів алмазного мікроточіння [1, 5] в поєднанні з хіміко-механічним поліруванням [3, 6–9], поліруванням за допомогою полірувальних дисперсних систем [10–12] з мікро- і нанопорошків алмаза [13], оксиду алюмінію [9], діоксиду церію [14, 15], AlCeH_3O_3 [16], МАХ-фази Ti_3AlC_2 [17–19], метаборату міді [20–24], а також зі згладжуванням іонним променем [2] або анодуванням в бораті натрію з подальшим розчиненням оксиду [25]. Під час полірування алюмінію швидкість видалення матеріалу залежить від товщини шару окислення, яке відбувається завдяки використанню полірувальної дисперсної системи з окислювачою спроможністю [7–9], розмірів і концентрації наночастинок шламу, що утворюються, а також режимних і кінематичних параметрів процесу обробки [16, 26]. Однак, до теперішнього часу механізм перенесення енергії від частинок дисперсної фази дисперсної системи до поверхні, що полірується, та утворення наночастинок шламу в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира остаточно не з'ясовано. Саме тому дослідження закономірностей утворення наночастинок шламу під час полірування алюмінію за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків є актуальними.

Метою роботи було дослідження закономірностей знімання оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю полірованої поверхні алюмінію під час полірування за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків метаборату міді.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження закономірностей знімання оброблюваного матеріалу здійснювались під час полірування плоских поверхонь деталей з алюмінію діаметром 42 мм на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притира з замші діаметром 100 мм за зусилля притискання 55,5 Н, частоти обертання притира 90 об/хв, зміщення 10 мм та довжини штриха 20 мм, середньої температури в зоні контакту оброблюваної деталі та притира 298 К. Полірування деталей з алюмінію здійснювали за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків метаборату міді (CuB_2O_4 , густина – 3,86 г/см³, статична діелектрична проникність $\epsilon_2 = 6,05$, ширина забороненої зони $E_g = 3,6$ еВ, параметри кристалічної ґратки $a = 1,148$ нм, $c = 0,562$ нм [20, 27–33]), в якій в якості дисперсного середовища використовувався гас (діелектрична проникність $\epsilon_3 = 2,1$). Частоти власних коливань частинок метаборату міді, які визначали за спектрами ІЧ-поглинання за допомогою Фур'є-спектрометра Nicolet 6700, складали 561, 571, 596,7, 626,2, 635,1, 638, 732,6, 777,1, 849,1, 869,8, 943,5, 983,5, 994,7, 1085,6, 1109,8 см⁻¹. Визначення розмірів та аналіз поверхні частинок метаборату міді здійснювали за допомогою растрового електронного мікроскопу Zeiss-EVO50 із системою мікроаналізу AZtec. Частинки полірувального порошку спостерігали у вигляді голчастих кристалів та пластинок розмірами від 5 до 10 мкм або тонких голок довжиною від 0,5 мкм до 1 мкм, а їхня ширина змінювалась від 262 до 556 нм, так що середній розмір частинок полірувального порошку в поперечному напрямку дорівнював 409 нм, а еліптичність частинок полірувального порошку оцінювали за значенням кута кривини твірної лінії, який складав 333,4°–341,6° [21, 22].

Довжина шляху тертя L_t частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні складала 132 мм, а час контакту t_c частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею складав 2,85 мкс. Знімання оброблюваного матеріалу визначали ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. ВЛР-200. Параметри шорсткості полірованих поверхонь визначали методом комп'ютерного моделювання [10, 17, 34–36]. Підготовку поверхонь деталей під полірування здійснювали за допомогою традиційних методів тонкого шліфування та мікроточіння [10, 13].

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

У процесі полірування деталей оптотехніки з алюмінію одночасно відбуваються окислювання поверхні і видалення оксиду алюмінію Al_2O_3 [5, 7–9, 25], у результаті чого відбувається утворення і видалення наночастинок шламу з оброблюваної поверхні, яка характеризується нанометровими параметрами шорсткості і складається з кластерів чистого алюмінію і оксиду алюмінію [6, 11, 16, 26, 37, 38]. Знімання оброблюваного матеріалу у відповідності до квантової теорії полірування [21, 23, 24, 35, 36] відбувається в результаті ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) [39–44] від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні за умови, що енергія E_2 (частота ν_2) коливань молекулярних фрагментів, з яких складаються кластери на поверхні частинок полірувального порошку (донор) більша, ніж енергія E_1 (частота ν_1) коливань атомів чи молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваної поверхні (акцептор).

Енергію коливань атомів чи молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваної поверхні можна оцінити за спектром поглинання алюмінію, в якому спостерігається пік поглинання з максимумом за 1,5 еВ [45], або із спектральної залежності оптичної провідності алюмінієвого дзеркала, в якій спостерігається максимум за довжини хвилі $\lambda \approx 800$ нм (1,55 еВ) [38]. З іншого боку, енергію коливань атомів в кластерах оброблюваної поверхні можна визначити за спектрами поглинання наночастинок алюмінію (Al-NPs), отриманими для кластерів тетраедричної форми Al_{20} , Al_{56} , Al_{120} , Al_{220} , Al_{364} , Al_{560} із довжиною сторін 1,4–141,4 нм, які характеризуються двома смугами поглинання, пов'язаними з двома типами локалізованих мод поверхневого плазмонного резонансу, що знаходяться в області 4,0–5,5 і 6,0–8,0 еВ [46]. Крім того, відомо, що для наночастинок Al-NPs, виготовлених методами лазерної абляції, характерними є смуги і піки в спектрах поглинання, які спостерігали за довжини хвилі ~ 209 нм (6,0 еВ) і ~ 263 нм (4,7 еВ) [47]; ~ 240 нм (5,2 еВ) і ~ 290 нм (4,3 еВ) [48]; 200–400 нм (3,1–6,2 еВ) [49]; ~ 223 і ~ 225 нм ($\sim 5,6$ еВ) [50]. Для наночастинок Al-NPs, нанесених термічним випаровуванням на підкладку, характерними є максимуми в спектрах поглинання, які в залежності від їхнього розміру (від 4 до 23 нм) спостерігаються в діапазоні довжин хвилі $\lambda \approx 300$ –750 нм (1,7–4,2 еВ) [51]. Із врахуванням того, що енергія коливань молекулярних фрагментів, з яких складаються кластери на поверхні частинок полірувального порошку (метаборату міді CuB_2O_4), яка визначена за смугами в спектрах ІЧ-поглинання в області від 600 до 1100 cm^{-1} і складає 75–135 меВ, набагато менше, ніж енергія коливань атомів в кластерах оброблюваної поверхні алюмінію, яка відповідає широкому діапазону спектру від ультрафіолетового до видимого і складає 1,5–8,0 еВ, можна зробити висновок, що резонансне перенесення енергії від частинок полірувального порошку до поверхні алюмінію безпосередньо неможливе.

Частоти коливань молекулярних фрагментів в кластерах оксиду алюмінію на оброблюваній поверхні визначали за спектрами ІЧ-поглинання наночастинок Al_2O_3 -NPs, які спостерігали в області від 500 до 1000 см^{-1} [52] і складали 570, 571, 573, 576, 813, 815, 820, 837 см^{-1} [53]. За припущення, що наночастишки шламу, які видаляються з оброблюваної поверхні алюмінію під час полірування, мають такі ж оптичні властивості, як наночастишки Al_2O_3 -NPs, було визначено значення частот коливань молекулярних фрагментів кластерів на оброблюваній поверхні і на поверхні частинки полірувального порошку ν_1 , ν_2 і спектрального розділення $\delta\nu = \nu_2 - \nu_1$, а також відповідних енергій E_1 , E_2 і розстроювання енергії $\delta E = E_2 - E_1$, за умови мінімуму $\delta E(\delta\nu)$.

Показано, що резонансне перенесення енергії від дисперсної системи до оброблюваної поверхні алюмінію відбувається під час квантових переходів між енергетичними рівнями донорно-акцепторних пар з енергіями $E_2 = 105,4\text{ меВ} \rightarrow E_1 = 103,9\text{ меВ}$ на частотах: $\nu_2 = 849,1\text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_1 = 837\text{ см}^{-1}$, а спектральне розділення і розстроювання енергії складають $\delta\nu = 12,1\text{ см}^{-1}$ і $\delta E = 1,5\text{ меВ}$ відповідно.

Із врахуванням того, що кластери на оброблюваній поверхні алюмінію складаються з оксиду алюмінію Al_2O_3 , який характеризується густиною $3,98\text{ г/см}^3$, діелектричною проникністю $\epsilon_1 = 9,3$ [54], шириною забороненої зони, характерною для Al_2O_3 -NPs – $4,24\text{--}5,05\text{ еВ}$ [53] і $4,37\text{--}5,51\text{ еВ}$ [55], для Al_2O_3 -наноструктур – $3,44\text{--}3,78\text{ еВ}$ [56], для об'ємного кристалу Al_2O_3 – $E_{\text{bulk}} = 2,6\text{ еВ}$ і для квантових точок Al_2O_3 -QDs розміром $4,28\text{ нм}$ – $3,6\text{ еВ}$ [57], а також параметрами кристалічної ґратки $0,47617$ і $1,29947\text{ нм}$ [54, 57], було розраховано кількість фрагментів Al_2O_3 (елементарних комірок) $\xi = 1179$, з яких складаються кластери на оброблюваній поверхні, які перетворюються в наночастишки шламу [35, 36, 58, 59]. На основі цього було визначено найбільш ймовірний розмір наночастинок шламу $a_v = 9,3\text{ нм}$, які утворюються під час полірування алюмінію за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків метаборату міді (CuB_2O_4).

Розміри наночастинок шламу, які утворились в результаті переходів кластерів оброблюваної поверхні із зв'язаного стану у вільний, порівнюємо з характерним борівським радіусом екситону, що визначається у відповідності до формули [60]

$$r_B = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_1\hbar^2 n_{\text{ex}}^2}{\mu e^2}, \quad (1)$$

де $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}\text{ Дж}\cdot\text{с}$ – стала Планка; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}\text{ Ф/м}$ – діелектрична проникність вакууму; $n_{\text{ex}} = 1, 2, \dots$ – номер рівня енергії екситону; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ Кл}$ – заряд електрону; μ – ефективна маса екситону.

З врахуванням того, що ефективна маса екситону, яка визначається за рівнянням

$$\frac{1}{\mu} = \left(\frac{1}{\mu_e^*} + \frac{1}{\mu_h^*} \right),$$

де $\mu_e^* = 0,28m_e$ і $\mu_h^* = 0,38m_e$ – ефективні маси електрону і дірки [57, 60]; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}\text{ кг}$ – маса електрону, складає $\mu = 0,161m_e = 1,47 \cdot 10^{-31}\text{ кг}$, можна показати, що другий ($n_{\text{ex}} = 2$) борівський радіус екситону більше розміру наночастинок шламу ($r_B = 12,2\text{ нм} > a_v = 9,3\text{ нм}$). Це означає, що наночастишки шламу являють собою квантові точки (Al_2O_3 -QDs) [57], які відповідають збудженому стану екситонів ($n_{\text{ex}} > 1$), складаються з понад 1000 елементарних

комірок Al_2O_3 , і мають розміри, які не перевищують другого борівського радіусу екситону (формула (1)).

Вказане дозволяє стверджувати, що під час полірування алюмінію, подібно до полірування напівпровідників і міді між рівнями енергії донорно-акцепторних пар на поверхнях частинки полірувального порошку і оброблюваного матеріалу відбувається ферстерівське резонансне перенесення енергії, опосередковане квантовими точками (QD-FRET) [23, 24, 61, 62], що зумовлює необхідність врахування квантово-розмірного ефекту, який полягає в залежності ефективної ширини забороненої зони квантової точки від її розміру. За величиною ефективної ширини забороненої зони Al_2O_3 -QDs, яка ви-

значена у відповідності до рівняння $E_{gqd} = E_{bulk} + \frac{2\pi^2\hbar^2 n_{ex}^2}{\mu a_v^2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_B}$ [57, 60,

63, 64] і складає 2,71 еВ, визначено енергію наночастинок шламу $E_m = 1,87$ еВ [23, 24], характерну для полірування алюмінію за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків метаборату міді. Варто зазначити, що для квантових точок Al_2O_3 розміром 4,28 нм, синтезованих за допомогою низькотемпературного хімічного методу [57], $E_{gqd} = 3,6$ еВ, що свідчить про квадратичну залежність ефективної ширини забороненої зони Al_2O_3 -QDs від їхнього розміру [23, 60].

Знімання оброблюваного матеріалу під час полірування алюмінію відбувається як видалення Al_2O_3 -QDs з його поверхні внаслідок QD-FRET [23, 24, 61, 62], яке відбувається у відкритому мікрорезонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку [21, 22, 43, 44, 65–67]. Швидкість знімання оброблюваного матеріалу V під час полірування залежить від розстроювання енергії δE та добротності мікрорезонатора $Q = E_1/(E_2 - E_1)$ і визначається у відповідності до загальної формули

$$V = \frac{L_t}{t_c} \eta \tau Q, \quad (2)$$

де η – коефіцієнт об'ємного зносу; L_t – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні; t_c – час їхнього контакту; τ – час життя Al_2O_3 -QDs у збудженому стані [22–24].

Взаємодія частинок полірувального порошку метаборату міді з поверхнею оброблюваної деталі з алюмінію під час полірування визначається силами міжмолекулярної взаємодії Ван-дер-Ваальса, які є силами притягання між квантовими точками Al_2O_3 на оброблюваній поверхні і кластерами CuB_2O_4 на поверхні частинки полірувального порошку, а потенціал взаємодії

$$W = -\frac{A}{8\pi d_p} \int_0^{d_p} \left[\frac{d_p}{2x} + \frac{d_p}{2(x+d_p)} + \ln\left(\frac{x}{x+d_p}\right) \right] dx \quad [12, 35, 68] \text{ залежить від сталої}$$

Ліфшиця $A = Eds(E_2 - E_1) = 0,46$ меВ, функції діелектричних проникностей $Eds = \frac{[\epsilon_1 - \epsilon_3][\epsilon_2 - \epsilon_3]}{[\epsilon_1 + \epsilon_3][\epsilon_2 + \epsilon_3]} = 0,306$, статичних діелектричних проникностей $\epsilon_1, \epsilon_2,$

ϵ_3 відповідно Al_2O_3 , CuB_2O_4 і гасу, розміру $d_p = 409$ нм частинки полірувального порошку і відстані x між частинкою і поверхнею, що полірується. За значенням потенціалу взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею $W = 0,058$ меВ було визначено концентрацію наночастинок шламу

$$N = \frac{2W}{\pi \hbar S_c} = 0,4 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1},$$

де $S_c = 1,39 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ – площа контакту поверхонь притира і деталі.

Коефіцієнт об'ємного зносу оброблюваної поверхні, який залежить від розмірів частинок шламу $a_v = 9,3 \text{ нм}$ та їхньої площі поверхні $S_0 = 274 \text{ нм}^2$, визначався у відповідності до формули $\eta = a_v^2 / 4\beta_0 t_c$, в якій β_0 є розв'язком трансцендентного рівняння [10, 12, 35, 43]

$$\frac{\exp(-\beta_0^2)}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\beta_0)} = \frac{\sqrt{L_t d_p S_c} \vartheta}{N S_0},$$

де $L_t = 0,132 \text{ м}$ – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку вздовж оброблюваної поверхні; $\vartheta = \frac{\lambda T L_t}{p_a u S_c} = 149,8$ – безрозмірний коефіцієнт;

$\lambda = 30,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ – коефіцієнт теплопровідності оксиду алюмінію; $T = 298 \text{ К}$ – середня температура в зоні контакту оброблюваної деталі та притира; $p_a = 40,1 \text{ кПа}$ – тиск притискання деталі до притира; $t_c = d_p / u = 2,85 \text{ мкс}$ – час контакту частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею; $u = 0,143 \text{ м/с}$ – швидкість відносного переміщення деталі і притира.

Час життя збудженого стану $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-QDs}$ на оброблюваній поверхні деталі з алюмінію визначали як величину, обернену ймовірності квантових переходів із збудженого стану кластерів частинок полірувального порошку у всі стани $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-QDs}$ з меншою енергією, у відповідності до формули

$$\tau = \frac{3N_m \hbar}{4\alpha^3 E_2},$$

де $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$ – стала тонкої структури; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – швидкість світла;

$N_m = 60$ – кількість можливих переходів [22, 35, 36].

Виходячи з розрахованих значень добротності мікрорезонатора $Q = 69,2$, коефіцієнта об'ємного зносу $\eta = 1,87 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$, часу життя квантових точок на оброблюваній поверхні у збудженому стані $\tau = 723 \text{ нс}$, у відповідності до формули (2) було розраховано швидкість знімання оброблюваного матеріалу $V = 43,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ [35, 36, 69, 70]. Під час експериментальної перевірки наведених результатів показано, що теоретично розраховане значення швидкості знімання оброблюваного матеріалу під час полірування алюмінію за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків метаборату міді CuB_2O_4 добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування, яка складала: $42,6 \pm 1,2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$, або $11,1 \pm 0,3 \text{ мкм/год}$, або $0,69 \pm 0,02 \text{ мг/хв}$. Незначне відхилення розрахункових і експериментальних даних, яке складало 1–5 %, свідчить, що під час полірування алюмінію, яке здійснювалось в мікрорезонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку, утворення і видалення наночастинок шламу внаслідок передачі енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні, відбувається за механізмом QD-FRET – ферстерівського резонансного перенесення енергії, опосередкованого квантовими точками $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-QDs}$, які утворюються на поверхні алюмінію.

Дослідження закономірностей формування нанопрофілю полірованої поверхні деталі з алюмінію показало, що параметри шорсткості полірованих

поверхонь, які визначали методом комп'ютерного моделювання [22, 34, 35, 59], складалі: $Ra = 9,8 \pm 0,3$ нм, $Rq = 10,2 \pm 0,4$ нм, $R_{\max} = 16,4 \pm 1,4$ нм. Ці параметри було розраховано за припущення, що наночастинки шламу мають форму паралелепіпедів, яка зумовлює утворення нанорозмірного рельєфу полірованих поверхонь у вигляді терасно-східчастих структур, залежать від їхнього розміру, розстроювання енергії, добротності мікрорезонатора тощо у відповідності до загальних закономірностей полірування [10, 35, 71]. Слід зазначити, що за таких значень параметрів шорсткості Ra , Rq , $R_{\max}$ можна вважати доцільним використання дисперсної системи з мікро- та нанопорошків метаборату міді для полірування алюмінію, оскільки вимоги, що висуваються до оптичних поверхонь, задовольняються ($Rz < 0,05$ мкм).

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження закономірностей знімання оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю полірованої поверхні під час полірування деталей оптотехніки з алюмінію за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків метаборату міді встановлено, що утворення і видалення наночастинок шламу внаслідок передачі енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні, відбувається за механізмом QD-FRET, опосередкованого квантовими точками, які утворюються на поверхні алюмінію Al_2O_3 -QDs.

Показано, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу під час полірування алюмінію за допомогою дисперсної системи на основі метаборату міді і гасу залежить від добротності мікрорезонатора і часу життя збудженого стану квантових точок оброблюваної поверхні строго у відповідності до загальних закономірностей процесу полірування.

Встановлено, що результати теоретичного розрахунку швидкості знімання оброблюваного матеріалу добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування алюмінію з відхиленням 1–5 %.

Показано, що за рівнем продуктивності полірування і шорсткості полірованих поверхонь для полірування деталей оптотехніки з алюмінію доцільно використовувати дисперсну систему з мікро- і нанопорошків метаборату міді.

ФІНАНСУВАННЯ

Дану роботу не фінансували із зовнішніх джерел.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють, що вони не мають конфлікту інтересів.

Yu. D. Filatov¹, T. O. Prikhna¹, A. Y. Boyarintsev², V. I. Sidorko³,
S. V. Kovalev¹

¹Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Institute for Scintillation Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

³State Enterprise "Engineering and Production Center Alkon"
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Mechanism of polishing of aluminum optical components

As a result of studying the patterns of removal of the processed material and the formation of the nanoprofile of the polished surface during the polishing of aluminum optical

components using a dispersed system of copper metaborate micro- and nanopowders, it was found that the formation and removal of sludge nanoparticles due to the transfer of energy from polishing powder particles to the processed surface occurs according to the QD-FRET mechanism - Förster resonance energy transfer mediated by quantum dots formed on the aluminum surface. It is shown that the removal rate of the processed material during the polishing of aluminum using a disperse system based on copper metaborate and kerosene depends on the quality factor of the microresonator, which is formed by the surfaces of the processed material and particles of the polishing powder, and the lifetime of the excited state of the quantum dots of the processed surface in accordance with the general laws of the polishing process. It is established that the results of the theoretical calculation of the removal rate of the processed material are in good agreement with the data of the experimental determination of the productivity of aluminum polishing with a deviation of 1–5%. It is shown that in terms of the level of polishing productivity and the roughness of polished surfaces for polishing aluminum optical parts, it is advisable to use a disperse system of copper metaborate micro- and nanopowders.

Keywords: polishing, quantum dot (QD), Förster resonance energy transfer (FRET), material removal rate (MRR), surface roughness.

1. ter Horst R., Tromp N. de Haan M., Navarro R., Venema L., Pragt J. Directly polished light weight aluminum mirror. *Proc. SPIE*. 2008. Vol. 7018, art. 701808.
2. Ulitschka M., Bauer J., Frost F., Arnold T. Improvement of the optical properties after surface error correction of aluminium mirror surfaces. *J. Europ. Opt. Soc.-Rapid Publ.* 2021. Vol. 17, no. 1. P. 1–13.
3. Liu F., Jia P., Shen H., Xu Y. Optical performance of aluminum mirror for cryogenic applications. *Optik*. 2021. Vol. 231, art. 166282.
4. Chioetto P., Zuppella P., Da Deppo V., Pace E., Morgante G., Terenzi L., Brienza D., Missaglia N., Bianucci G., Spinelli S., Guerriero E., Rossi M., Besset C.-G., Bondet C., Chauveau G., Porta C., Malaguti G., Micela G. Qualification of the thermal stabilization, polishing and coating procedures for the aluminum telescope mirrors of the ARIEL mission. *Exp. Astron.* 2022. Vol. 53. P. 885–904.
5. Moeggenborg K., Vincer T., Lesiak S., Salij R. Super-polished aluminum mirrors through the application of chemical mechanical polishing techniques. *Proc. SPIE*. 2006. Vol. 6288, id. 62880L.
6. Zhao G., Wie Z., Wang W., Feng D., Xu A., Liu W., Song Z. Review on modeling and application of chemical mechanical polishing. *Nanotechnol Rev.* 2020. Vol. 9. P. 182–189.
7. Ogawa H., Tokuyama Y., Yanagisawa M., Nakagawa H., Kikuchi J., Horiike Y. Study on the mechanisms of chemical mechanical polishing on copper and aluminum surfaces employing in situ infrared spectroscopy. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2003. Vol. 42. Part 1, no. 6A. P. 3582–3587.
8. Wang Y., Chen Y., Zhao Y., Min P., Qi F., Liu X., Zhao D. Chemical mechanical planarization of Al alloy in alkaline slurry at low down pressure. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2016. Vol. 28, no. 4. P. 3364–3372.
9. Li T., Sun H., Wang D., Huang J., Li D., Lei F., Sun D. High-performance chemical mechanical polishing slurry for aluminum alloy using hybrid abrasives of zirconium phosphate and alumina. *Appl. Surf. Sci.* 2021. Vol. 537, art. 147859.
10. 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.
11. Filatov Yu.D. Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing. In: J. Zhang, B. Guo, J. Zhang (Eds.), *Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining*, Springer Tracts in Mechanical Engineering, Springer, Singapore, 2019. P. 129–165.
12. 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.
13. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
14. 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.

15. Babitha K.K., Sreedevi A., Priyanka K.P., Sabu B., Varghese T. Structural characterization and optical studies of CeO₂ nanoparticles synthesized by chemical precipitation. *Ind. J. Pure Appl. Phys.* 2015. Vol. 53. P. 596–603.
16. Song P., Yang C., Bai Y., Ding J., Guo J., Li C., Wang Y., Xue C. High-precision turning and ultra-smooth direct polishing of aluminum alloy mirrors. *Opt. Express.* 2023. Vol. 31, is. 19, P. 30340–30358.
17. Filatov Yu.D., Vetrov A.G., Sidorko V.I., Filatov A.Yu., Kovalev S.V. A mechanism of diamond-abrasive finishing of monocrystalline silicon carbide. *J. Superhard Mater.* 2013. Vol. 35, no. 5. P. 303–308.
18. Filatov Yu.D., Vetrov A.G., Sidorko V.I., Filatov O.Yu., Kovalev S.V., Kurilovich V.D., Danil'chenko M.A., Prikhna T.A., Borimsky A.I., Kutsai A.M., Poltorats'kyi V.G. Polishing of optoelectronic components made of monocrystalline silicon carbide. *J. Superhard Mater.* 2015. Vol. 37, no. 1. P. 48–56.
19. Prikhna T.A., Starostina A.V., Lizkendorf D., Petrusha I.A., Ivakhnenko S.A., Borimskii A.I., Filatov Yu.D., Loshak M.G., Serga M.A., Tkach V.N., Turkevich V.Z., Sverdun V.B., Klimenko S.A., Turkevich D.V., Dub S.N., Basyuk T.V., Karpets M.V., Moshchil V.E., Kozyrev A.V., Il'nitskaya G.D., Kovylyayev V.V., Cabiosh T., Chartier P. Studies of the oxidation stability, mechanical characteristics of materials based on max phases of the Ti–Al–(C, N) systems, and of the possibility of their use as tool bonds and materials for polishing, *J. Superhard Mater.* 2014. Vol. 36, no. 1. P. 9–17.
20. 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.
21. Filatov Yu.D., Boyarintsev A.Yu., Sidorko V.I., Kovalev V.A., Kolesnikov O.V., Novgorodtsev V.O., Polupan Ya.I. Mechanism of polishing for polystyrene based scintillators. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 5. P. 390–401.
22. Filatov Yu.D., Boyarintsev A.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kolesnikov O.V. Polishing of polystyrene scintillators. *Functional Mater.* 2023. Vol. 30, no. 3. P. 424–430.
23. Filatov Yu.D., Boyarintsev A.Yu., Kolesnikov O.V., Galkin S.M., Novgorodtsev V.O., Polupan Ya.I., Pylypenko O.I., Sidorko V.I., Kovalev S.V. Polishing of optotechnical parts made of semiconductor materials. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no 2. P. 125–136.
24. Filatov Yu.D., Prikhna T.O., Boyarintsev A.Yu., Sidorko V.I., Kovalev V.A., Rybalka I.A. Polishing techniques for optical components of glass, semiconductors, and copper. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no 4. P. 300–310.
25. Iwai M., Kikuchi T. A novel polishing process for ultra-smooth aluminum surfaces via anodizing in sodium metaborate. *J. Electrochem. Soc.* 2023. Vol. 170, art. 073506.
26. Yin Z., Yi Z. Direct polishing of aluminum mirrors with higher quality and accuracy. *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54, no. 26. P. 7835–7841.
27. Tomov V., Rafailov P.M., Yankova L. Raman spectroscopy investigation of the polar vibrational modes in CuB₂O₄. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. Vol. 682, art. 012028.
28. Ivanov V.G., Abrashev M.V., Todorov N.D., Tomov V., Nikolova R.P., Litvinchuk A.P., Iliev M.N. Phonon and magnon Raman scattering in CuB₂O₄. *Phys. Rev. B.* 2013. Vol. 88, art. 094301.
29. Feng Y., Xu H.-G., Zheng W., Zhao H., Kandalam A.K., Jena P. Structures and photoelectron spectroscopy of Cu_n(BO₂)_m – (n, m = 1, 2) clusters: Observation of hyperhalogen behavior. *J. Chem. Phys.* 2011. Vol. 134, art. 094309.
30. Şenberber Dumanli F.T., Kavci Karaagac S., Kipcak A.S., Moroydor Derun E. Sonochemical synthesis of copper borates: Effect of reaction conditions on the characteristic properties. *J. Turk. Chem. Soc. Sect. A: Chem.* 2024. Vol. 11, no. 2. P. 461–466.
31. Ursu D., Dabici A., Miclau M., Miclau N. Low-temperature hydrothermal synthesis of hierarchical flower-like CuB₂O₄ superstructures. *Proc. Appl. Ceram.* 2020. Vol. 14, no. 2. P. 113–118.
32. Mero R.D., Lai C.-H., Du C.-H., Liu H.-L. Spectroscopic signature of spin–charge–lattice coupling in CuB₂O₄. *J. Phys. Chem. C.* 2021. Vol. 125, no. 7. P. 4322–4329.
33. 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.
34. Filatov Yu.D. Polishing of aluminosilicate materials with tools with bound polishing powder. *Sverkhtverdye Materialy.* 2001. no. 3. P. 36–49.

35. Filatov Yu.D. Quantum mechanism of optical glass polishing. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 4. P. 303–313.
36. Filatov Yu.D. Material removal rate in polishing polymethymethacrylate parts. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 3. P. 212–220.
37. Zhao T., Hu H., Peng X-Q., Du Ch-Y., Guan Ch-L., Yong J-H. Study on the surface crystallization mechanism and inhibition method in the CMP process of aluminum alloy mirrors. *Appl. Opt.* 2019. Vol. 58, no. 22. P. 6091–6097.
38. Поперенко Л.В., Стащук В.С., Шайкевич І.А., Одарич В.А. Діагностика поверхні поляризованим світлом: Монографія. Київ: Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”, 2007. 336 с.
39. Jones G.A., Bradshaw D.S. Resonance Energy transfer: from fundamental theory to recept applications. *Front. Phys.* 2019. Vol. 7, no. 100. P. 1–19.
40. 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.
41. Cortes C.L., Jacob Z. Fundamental figures of merit for engineering Förster resonance energy transfer. *Opt. Express.* 2018. Vol. 26, no. 15. P. 19371–19387.
42. 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. art. 129770.
43. 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.
44. 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.
45. Поперенко Л.В., Стащук В.С. Основи фізики матеріалів оптотехніки: Навчальний посібник. Київ: Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”, 2011. 686 с.
46. Zhang P., Jin W., Liang W. Size-dependent optical properties of aluminum nanoparticles: from classical to quantum description. *J. Phys. Chem. C.* 2018. Vol. 122, no. 19. P. 10545–10551.
47. Afanasyev D.A., Ibrayev N.Kh., Serik A.-F.E. Optical properties of Al nanoparticles prepared by laser ablation method. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. Vol. 447, art. 012032.
48. Kuladeep R., Jyothi L., Prakash P., Mayank Shekhar S., Durga Prasad M., Narayana Rao D. Investigation of optical limiting properties of Aluminium nanoparticles prepared by pulsed laser ablation in different carrier media. *J. Appl. Phys.* 2013. Vol. 114, no. 24. art. 243101.
49. Naseri F., Dorrani D. Effect of aluminum nanoparticles on the linear and nonlinear optical properties of PVA. *Opt. Quant. Electron.* 2016. Vol. 49, no. 4. P. 1–15.
50. Al-Kifaie A.M.A. The optical spectrum of Aluminum nanoparticles prepared by a laser ablation technique in the liquid. *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 928. art. 072045.
51. Lachebi I., Fedala A., Djenizian T., Hadjersi T., Kechouane M. Morphological and optical properties of aluminum nanoparticles deposited by thermal evaporation on heated substrates. *Surf. Coat. Technol.* 2018. Vol. 343. P. 160–165.
52. Goswami R., Goswami Y.C., Shahrestasni M. Synthesis and characterization of aluminium oxide nano adsorbents via a sustainable combustion method for methyl red remediation. *Rev. Roum. Chim.* 2024. Vol. 69, nos. 10–12. P. 595–603.
53. Gholizadeh Z., Aliannezhadi M., Ghominejad M., Tehrani F.S. High specific surface area γ - Al_2O_3 nanoparticles synthesized by facile and low-cost co-precipitation method. *Sci. Rep.* 2023. Vol. 13. P. 6131–6141.
54. Telmer M.R., Hilario M.S., Hoff B.W., Lanagan M.T., Reeja-Jayan B. Anisotropy of W-band complex permittivity in Al_2O_3 . *J. Phys.: Condens. Matter.* 2019. Vol. 31, art. 225702.
55. Atrak K., Ramazani A., Fardood Taghavi S. Green synthesis of amorphous and gamma aluminum oxide nanoparticles by tragacanth gel and comparison of their photocatalytic activity for the degradation of organic dyes. *J. Mater. Sci.: Mater. Electr.* 2018. Vol. 29, no. 10. P. 8347–8353.
56. Abbas I.A., Al-Mayalee K.H. Structural and optical properties of Al_2O_3 nanostructures prepared by hot water treatment method. *Rev. Compos. Matér. Avanc. J. Compos. Adv. Mater.* 2024. Vol. 34, no. 4. P. 527–532.

57. Nemade K.R., Waghuley S.A. Low temperature synthesis of semiconducting α -Al₂O₃ quantum dots. *Ceram. Int.* 2014. Vol. 40, no. 4. P. 6109–6113.
58. 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.
59. 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. Vol. 23, no. 1. P. 104–110.
60. Бардашевська С.Д., Будзуляк І.М., Будзуляк С.І., Рачій Б.І., Бойчук А.М. Напівпровідникові квантові точки як матеріали для лазерів на їх основі. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2018. Т. 19, № 2. С. 113–129.
61. Saha J., Datta Roy A., Dey D., Bhattacharjee D., Arshad Hussain S. Role of quantum dot in designing FRET based sensors. *Mater. Today: Proc.* 2018. Vol. 5, no. 1. P. 2306–2313.
62. Chern M., Toufanian R., Dennis A. Quantum dot to quantum dot Förster resonance energy transfer: engineering materials for visual color change sensing. *Analyst.* 2020. Vol. 145. P. 5754–5767.
63. Nemade K.R., Waghuley S.A. UV–VIS spectroscopic study of one pot synthesized strontium oxide quantum dots. *Resul. Phys.* 2013. Vol. 3. P. 52–54.
64. Rose V., Franchy R. The band gap of ultrathinamorphous and well-ordered Al₂O₃ films on CoAl (100) measured by scanning tunneling spectroscopy. *J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 105. P. 07C902–07C905.
65. Du M., Martinez-Martinez L.A., Ribeiro R.F., Hu Z., Menon V., Yuen-Zhou J. Theory for polariton-assisted remote energy transfer. *Chem. Sci.* 2018. Vol. 9. P. 6659–6669.
66. 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.
67. 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, art. 012001.
68. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kovalev V.A. Effect of interaction between polishing powder particles and a treated material on polishing characteristics of optical surfaces. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 4. P. 296–302.
69. Бовсуновський А.П. Електротехнічні матеріали: Корот. довідник К.: НУХТ, 2012. 36 с.
70. Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Filatov Y.D., Vetrov A.G. Material removal rate in polishing anisotropic monocrystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 2. P. 123–131.
71. Filatov Yu.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.

Надійшла до редакції 17.03.25

Після доопрацювання 18.03.25

Прийнята до опублікування 21.03.25