

УДК 621.923.7

**Ю. Д. Філатов^{1,*}, Т. О. Пріхна¹, А. Ю. Бояринцев²,
В. І. Сідорко³, С. В. Ковальов¹, І. А. Рибалка²**

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

Полірування деталей оптотехніки зі скла, напівпровідників і міді

В результаті дослідження закономірностей знімання оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю полірованої поверхні під час полірування деталей оптотехніки зі скла, напівпровідників і міді за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків встановлено, що утворення наночастинок шламу внаслідок передачі енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні, відбувається за механізмом FRET у випадку скла, або QD-FRET, опосередкованого квантовими точками, які утворюються на поверхнях напівпровідників і міді. Показано, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу зменшується за підвищення енергії зв'язку скла, або ефективної ширини забороненої зони квантових точок напівпровідників чи оксидів міді, що утворюються на її поверхні, а залежності енергії наночастинок шламу від їхнього найбільш ймовірного розміру описуються лінійною функцією для K8 і ПММА або параболічною функцією для Ge, InSb і міді. Встановлено, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу під час полірування деталей оптотехніки з оптичного скла марки K8, поліметилметакрилату, германію, антимоніду індію і міді лінійно зростає за підвищення добротності мікрорезонатора і часу життя збудженого стану кластерів чи квантових точок оброблюваної поверхні відповідно до загальних закономірностей полірування. Показано, що параметри шорсткості полірованих поверхонь R_a , R_q , R_{max} і R_z разом зі швидкістю знімання оброблюваного матеріалу можна використовувати в якості критерію оцінки ефективності полірування. Показано також, що результати теоретичного розрахунку швидкості знімання оброблюваного матеріалу добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування скла, напівпровідникових кристалів і міді за відхилення 2–5 %.

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

ВСТУП

Полірування деталей оптотехніки з діелектриків, провідників і напівпровідників, які широко використовують в якості лінз, призм, вікон, дзеркал, датчиків, підкладинок для світлодіодів, елементів для приладів нічного бачення, детекторів іонізуючого випромінювання, ІЧ-фільтрів і сонячних батарей для оптики, мікроелектроніки, космічної техніки, радіології та радіохімії, здійснюють методом притирання за допомогою полірувальних дисперсних систем з мікро- і нанопорошків на шліфувальних і полірувальних верстатах різних типів та моделей [1–7]. Швидкість знімання оброблюваного матеріалу і шорсткість полірованих поверхонь, які залежать від фізико-хімічних властивостей матеріалу, притира і дисперсної системи, режимних і кінематичних параметрів процесу обробки, визначають ефективність полірування [8–12]. Однак, до теперішнього часу механізм перенесення енергії від частинок дисперсної фази дисперсної системи до поверхні, що полірують, 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 деталей оптотехніки зі скла, напівпровідників і міді за допомогою дисперсійних систем з мікро- і нанопорошків є актуальними.

Метою роботи було дослідження закономірностей знімання оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю полірованої поверхні під час полірування деталей оптотехніки зі скла, напівпровідників і міді за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження закономірностей знімання оброблюваного матеріалу здійснювали під час полірування плоских поверхонь деталей зі скла, напівпровідників і міді на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притира з пінополіуретану або замші діаметром 100 мм за зусилля притискання 10–50 Н, частоти обертання притира 90 об/хв, зміщення 10–30 мм та довжини штриха 20–80 мм, середньої температури в зоні контакту оброблюваної деталі та притира 298 К.

Оброблювали деталі з оптичного скла марки К8 (діаметр – 60 мм, густина – $2,52 \text{ г/см}^3$, статична діелектрична проникність – 6,5, енергія зв'язку – 3,9 еВ [2, 4, 13, 14]), органічного скла – поліметилметакрилату (ПММА, діаметр – 60 мм, густина – $1,18 \text{ г/см}^3$, статична діелектрична проникність – 3,9, енергія зв'язку – 1,6 еВ [15–18]), напівпровідникових матеріалів – антимоніду індію (InSb, 6 деталей розмірами $18 \times 7,5 \times 0,6 \text{ мм}$, загальна площа – $8,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, густина – $5,775 \text{ г/см}^3$, статична діелектрична проникність – 16,8, ширина забороненої зони $E_g = 0,17 \text{ еВ}$, параметр кристалічної ґратки $a = 0,648 \text{ нм}$ [19–22]) і германію (Ge, загальна площа – $20,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, густина – $5,32 \text{ г/см}^3$, статична діелектрична проникність – 16, ширина забороненої зони – 0,66 еВ, параметр кристалічної ґратки – 0,566 нм [1, 23, 24], а також міді (Cu, діаметр – 42 мм, густина – $8,93 \text{ г/см}^3$, параметр кристалічної ґратки – 0,361 нм [25, 26]). Полірування деталей оптотехніки здійснювали за допомогою дисперсних систем з мікро- та нанопорошків ДС1 (метаборат міді, густина – $3,86 \text{ г/см}^3$, статична діелектрична проникність – 6,1, ширина забороненої зони $E_g = 3,6 \text{ еВ}$, параметри кристалічної ґратки $a = 1,148 \text{ нм}$, $c = 0,562 \text{ нм}$ [3, 12, 14, 27]) і ДС2

(двооксид церію, густина – $6,26 \text{ г/см}^3$, статична діелектрична проникність – 21,2, ширина забороненої зони $E_g = 3,3 \text{ еВ}$, параметр кристалічної ґратки $a = 0,5411 \text{ нм}$) [2, 4, 14, 28–31]). Для полірування деталей із міді використовували дисперсні системи ДС1* і ДС2*, в яких в якості дисперсного середовища замість води використовували гас.

Визначення розмірів та аналіз поверхні частинок дисперсної фази полірувальних дисперсних систем здійснювали за допомогою растрового електронного мікроскопу “Zeiss-EVO50” з системою мікроаналізу AZtec та сканувального мікроскопу-аналізатора Camscan-4DV [14, 18]. Середній розмір частинок полірувального порошку в дисперсних системах складав 409 нм (ДС1) і 910 нм (ДС2). Довжина шляху тертя L_t частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні складала 188 мм для оптичного скла К8 і ПММА, 159 мм для Ge, 101 мм для InSb і 132 мм для Cu, а час контакту t_c частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею складав: під час полірування К8, ПММА – 1,9 мкс (ДС2), Ge і InSb – 1,1 мкс (ДС1), міді – 3,2 мкс (ДС1*) і 8,9 мкс (ДС2*). Знімання оброблюваного матеріалу визначали ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. ВЛР-200. Параметри шорсткості полірованих поверхонь визначали методом комп’ютерного моделювання та контролювали за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографу Micron-alpha [2, 10, 14, 32–34]. Підготовку поверхонь деталей під полірування здійснювали за допомогою традиційних методів тонкого шліфування та мікроточіння [2, 11].

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Згідно з сучасними уявленнями про механізм полірування неметалевих матеріалів знімання оброблюваного матеріалу відбувається за рахунок переходів між рівнями енергії донорно-акцепторних пар внаслідок ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) [35–40], що здійснюється у відкритому мікрорезонаторі, який утворено поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку [27, 41–44]. Швидкість знімання оброблюваного матеріалу V під час полірування залежить від розстроювання енергії δE та добротності мікрорезонатора Q і визначається у відповідності до загальної формули

$$V = \frac{L_t}{t_c} \eta \tau Q, \quad (1)$$

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 кластерів оброблюваної поверхні у збудженому стані [14, 18, 24, 27].

Знімання оброблюваного матеріалу під час полірування оптичного скла марки К8 і поліметилметакрилату відбувається в результаті FRET від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні тільки тоді, коли 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 молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваної поверхні (акцептор). Розстроювання енергії $\delta E = E_2 - E_1$ (спектральне розділення $\delta \nu = \nu_2 - \nu_1$) визначає кількість ξ молекулярних фрагментів (елементарних комірок) в кластері оброблюваної поверхні, який перетворюється в наночастинку шламу з найбільш ймовірним розміром a_v , а енергія E_m наночастинок шламу залежить від енергії зв’язку E_{bind} оброблюваного матеріалу [14, 18, 22, 27]. Параметри взаємодії оброблюваної повер-

хні з дисперсною системою під час полірування оптичного скла марки К8 і поліметилметакрилату, розраховані в наближенні одномодового режиму FRET у відповідності до [14, 18], наведено в табл. 1, 2.

Таблиця 1. Параметри наночастинок шламу під час полірування оптичного скла К8, ПММА, германію, антимоніду індію і міді

Параметри взаємодії оброблюваної поверх- ні з полірувальною дисперсною системою	Оброблюваний матеріал					
	K8	ПММА	Ge	InSb	Cu	
	Дисперсна система					
	ДС2		ДС1		ДС1*	ДС2*
$\nu_1, \text{см}^{-1}$	895,4	840,0	300,0	140,0	622,7	1037,0
$\nu_2, \text{см}^{-1}$	909,4	848,0	318,0	147,0	635,1	1044,4
$\delta\nu, \text{см}^{-1}$	14,1	8,0	18,0	7,0	12,4	7,4
$E_1, \text{меВ}$	111,1	104,3	37,2	17,4	77,3	128,7
$E_2, \text{меВ}$	112 ,9	105,3	39,5	18,2	78,8	129,6
$\delta E, \text{меВ}$	1,75	0,99	2,23	0,87	1,54	0,92
ξ	996	2730	65	95	618	4875
$a_v, \text{нм}$	6,5	14,3	2,8	3,7	5,0	10,4

Знімання оброблюваного матеріалу під час полірування напівпровіднико-вих матеріалів (InSb і Ge) відбувається в результаті QD-FRET – ферстерівсь-кого резонансного перенесення енергії, опосередкованого квантовими точка-ми, які утворюються на поверхнях оброблюваного матеріалу і частинки полі-рувального порошку і перетворюються в наночастинки шламу і наночастинки зносу полірувального порошку [24]. Енергія E_2 (частота ν_2) коливань молеку-лярних фрагментів, з яких складаються кластери на поверхні частинок полі-рувального порошку, і енергія E_1 (частота ν_1) коливань атомів або молеку-лярних фрагментів в кластерах оброблених поверхні, а також розстроювання енергії δE (спектральне розділення $\delta\nu$), які визначають кількість ξ елементар-них комірок в кластері оброблюваної поверхні і найбільш ймовірний розмір a_v , а також ефективну ширину забороненої зони E_{gqd} квантової точки і енер-гію E_m наночастинки шламу, визначені за раманівськими спектрами розсію-вання світла і спектрами ІЧ-поглинання [1, 45–48], наведено в табл. 1, 2.

Механізм знімання оброблюваного матеріалу під час полірування металів є дещо відмінним, оскільки в процесі полірування деталей оптотех-ніки, зокрема з міді, одночасно відбуваються хімічне модифікування по-верхневого шару завдяки використанню дисперсних систем, до складу яких входять полірувальні порошки (двооксид кремнію, двооксид церію тощо) та окислювачі (перекис водню, іодат калію, персульфат калію то-що), і механічне видалення оксидів міді $\text{CuO/Cu}_2\text{O}$, що утворюються [5, 7, 8, 49–51]. Це зумовлено тим, що резонансне перенесення енергії від час-тинок полірувального порошку до поверхні металу безпосередньо немож-ливе, оскільки енергія коливань молекулярних фрагментів (десятки меВ), з яких складаються кластери на поверхні частинок полірувального порош-ку, набагато менша енергії, яка відповідає краю поглинання міді (2,0–2,4 еВ) з максимумом 4,5 еВ, і може перевищувати енергію коливань мо-лекулярних фрагментів в кластерах $\text{Cu/CuO/Cu}_2\text{O}$ [1, 52]. Наночастинки Cu-NPs , виготовлені методами хімічного відновлення, лазерної абляції,

біотехнологій тощо, мають характерні смуги і піки в спектрах ІЧ-поглинання (см^{-1}), характерні для зв'язків Cu–O: 612, 873, 1100 [53]; 550–570 і 561,25 [54]; 622,72–645,61 і 522,54–523,98 [55]; 623, 777, 1113 і 1180 [56]; 991 [57] та Cu–O–H: 870–880 і 873,69 [54]; 876,76–877,08 [55]. Наночастинки CuO-NPs характеризуються частотами (см^{-1}): 402 і 1037 [58]; 473 [59]; 506,38 [60], а для наночастинок Cu_2O -NPs характерними є 624 см^{-1} [59] і $624,57 \text{ см}^{-1}$ [60].

За припущення, що наночастинки шламу, які видаляються з оброблюваної поверхні міді під час полірування і мають такі ж оптичні властивості, як наночастинки Cu-NPs, CuO-NPs і Cu_2O -NPs, було визначено значення частот коливань молекулярних фрагментів кластерів на оброблюваній поверхні й на поверхні частинки полірувального порошку ν_1 , ν_2 і спектрального розділення $\delta\nu$, а також відповідних енергій E_1 , E_2 і розстроювання енергії δE , за умови мінімуму δE ($\delta\nu$). Показано, що резонансне перенесення енергії від дисперсної системи до оброблюваної поверхні міді відбувається під час квантових переходів між енергетичними рівнями на частотах: $\nu_2 = 635,1 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_1 = 622,7 \text{ см}^{-1}$ для DC1^* [18, 55] і $\nu_2 = 1044,4 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_1 = 1037,0 \text{ см}^{-1}$ для DC2^* [58, 61]. З врахуванням того, що під час окислення поверхні міді в нанорозмірній системі Cu/ Cu_2O /CuO утворюється нанокристали Cu, які окислюються з утворенням висококристалічного Cu_2O і тонкого шару CuO, можна вважати, що кластери на оброблюваній поверхні складаються з оксиду міді (I) Cu_2O – напівпровідника, який характеризується густиною $6,0 \text{ г/см}^3$, діелектричною проникністю 7,5, шириною забороненої зони $E_g = 2,17 \text{ еВ}$ і параметром кристалічної ґратки $0,42696 \text{ нм}$ і (або) оксиду міді (II) CuO – напівпровідника, який характеризується густиною $6,315 \text{ г/см}^3$, діелектричною проникністю 12,98, шириною забороненої зони $E_g = 1,3 \text{ еВ}$ і параметрами кристалічної ґратки $a = 0,4684 \text{ нм}$, $b = 0,3423 \text{ нм}$, $c = 0,5129 \text{ нм}$ [52, 62–67].

На основі цього було визначено кількість елементарних комірок ξ , з яких складаються кластери на оброблюваній поверхні, та найбільш ймовірний розмір наночастинок шламу, які утворюються під час полірування міді за допомогою дисперсних систем DC1^* ($a_v = 5,0 \text{ нм}$) і DC2^* ($a_v = 10,4 \text{ нм}$) (табл. 1), і показано, що ці наночастинки є квантовими точками (КТ) з розмірами 2–20 нм, характерними для квантових точок CuO-QDs і Cu_2O -QDs [1, 62, 65–68], що утворюються на поверхнях міді, напівпровідників, сапфіру, графену тощо [65, 69–71].

Вказане дозволяє стверджувати, що під час полірування міді подібно до полірування напівпровідників антимоніду індію (InSb) і германію (Ge), між рівнями енергії донорно-акцепторних пар на поверхнях частинки полірувального порошку і оброблюваного матеріалу відбувається ферстерівське резонансне перенесення енергії, опосередковане квантовими точками (QD-FRET) [24, 72, 73], що зумовлює необхідність врахування квантово-розмірного ефекту, який полягає в залежності ефективної ширини забороненої зони КТ від її розміру у відповідності до формули [24, 65]

$$E_{gqd} = E_g + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2a_v^2} \left(\frac{1}{\mu_e^*} + \frac{1}{\mu_h^*} \right),$$

де μ_e^* , μ_h^* – ефективні маси електрона і дірки відповідно. Виходячи з оцінки $\mu_e^* = 0,98 m_e$, $\mu_h^* = 0,66 m_e$ (Cu_2O -QDs) [65] і $\mu_e^* = 0,4 m_e$, $\mu_h^* = 7,9 m_e$ (CuO-QDs) [67] ($m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ – маса електрона), визначено ефективну ширину забороненої зони КТ, характерної для полірування міді за допомогою дисперсних

систем ДС1* ($E_{gqd} = 2,32$ еВ) і ДС2* ($E_{gqd} = 1,34$ еВ) і відповідно енергії наночастинок шламу $E_m = 0,13$ еВ і $E_m = 9,98$ еВ (табл. 2).

На основі загальної методики [4, 14, 18, 24, 27, 32, 39, 74, 75] у відповідності до формули (1) було розраховано добротності мікрорезонатора Q , коефіцієнти об'ємного зносу η , час життя квантових точок на оброблюваній поверхні τ у збудженому стані, а також швидкість знімання оброблюваного матеріалу ν (табл. 2) і параметри шорсткості полірованих поверхонь деталей оптотехніки (табл. 3).

Таблиця 2. Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою і швидкість знімання оброблюваного матеріалу під час полірування

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з полірувальною дисперсною системою	Оброблюваний матеріал					
	K8	ПММА	Ge	InSb	Cu	
	Дисперсна система					
	ДС2		ДС1		ДС1*	ДС2*
E_{bind} , eВ	3,9	1,6	—	—	—	—
E_{gqd} , eВ	—	—	0,86	0,41	2,32	1,34
E_m , eВ	0,59	5,33	3,19	2,14	0,13	9,98
Q	31,9	105,0	16,7	20,0	50,2	140,1
τ , нс	976	1279	257	835	709	1773
η , 10^{-12} м ² /с	3,30	5,00	1,42	1,10	1,33	1,16
ν , 10^{-13} м ³ /с	99,5	652	8,8	16,7	19,6	42,5
Експеримент: мкм/год	12,5	86,0	1,6	7,7	5,3	10,6
мг/хв	1,5	4,8	0,3	0,6	1,1	2,2
10^{-13} м ³ /с	98,1	678	9,1	17,3	20,5	40,7
Похибка розрахунку, %	2	4	4	4	4	5

В результаті аналізу даних, наведених в табл. 1, 2 встановлено, що під час полірування деталей оптотехніки за допомогою полірувальних дисперсних систем з мікро- і нанопорошків швидкість знімання оброблюваного матеріалу зменшується за підвищення енергії зв'язку скла (К8, ПММА), або ефективної ширини забороненої зони квантових точок напівпровідника (Ge, InSb) чи оксидів міді (Cu₂O, CuO), що утворюються на її поверхні (рис. 1). Показано, що залежність енергії наночастинок шламу E_m від їхнього найбільш ймовірного розміру a_v є лінійною для К8 і ПММА (рис. 2, пряма 1) і квадратичною функцією для Ge, InSb і міді (рис. 2, крива 2), яку можна апроксимувати параболічною функцією, що має вигляд [24]

$$E_m = A(a_v - \alpha)^2 + \beta,$$

де $A = 0,35$ еВ/нм²; $\alpha = 5,6$ нм, $\beta = 0,3$ еВ. Це дозволяє зробити висновок, що знімання оброблюваного матеріалу під час полірування дійсно є результатом утворення і видалення наночастинок шламу внаслідок передачі енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні, за допомогою FRET у випадку скла (К8, ПММА), або QD-FRET, опосередкованого квантовими точками, які утворюються на поверхнях напівпровідників (Ge, InSb), або QD-FRET, опосередкованого квантовими точками CuO-QDs і Cu₂O-QDs, що виникають під час окислення міді.

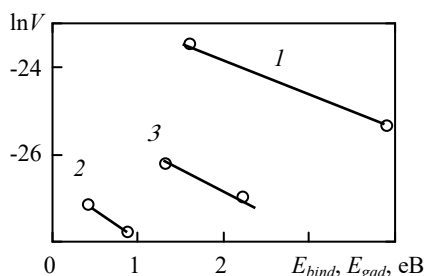


Рис. 1. Залежність швидкості знімання оброблюваного матеріалу від енергії зв'язку чи ефективної ширини забороненої зони оброблюваного матеріалу: 1 – К8, ПММА; 2 – Ge, InSb; 3 – мідь.

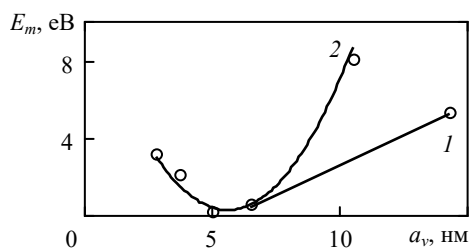


Рис. 2. Залежність енергії наночастинок шламу E_m від їхнього найбільш ймовірного розміру a_v : 1 – К8, ПММА; 2 – Ge, InSb, Cu.

Таблиця 3. Параметри шорсткості полірованих поверхонь деталей оптотехніки з оптичного скла К8, ПММА, германію, антимоніду індію і міді

Оброблюваний матеріал	К8	ПММА	Ge	InSb	Cu	
Дисперсна система	ДС2		ДС1		ДС1*	ДС2*
Ra , нм	8,2±0,5	22,9±1,9	6,5±0,2	8,4±0,3	9,8±0,4	16,9±1,0
Rq , нм	8,6±0,2	24,6±1,8	6,8±0,2	8,8±0,3	10,5±0,4	18,4±0,6
$Rmax$, нм	14,0±1,2	37,9±3,7	11,5±1,1	14,4±1,7	14,6±1,6	29,6±1,3

Показано, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу під час полірування деталей оптотехніки з оптичного скла марки К8, поліметилметакрилату, германію, антимоніду індію і міді за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків лінійно зростає за підвищення добротності мікрорезонатора, який утворюється поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку (рис. 3) і часу життя збудженого стану кластерів чи квантових точок обробленої поверхні (рис. 4) у строгій відповідності до рівняння (1), що свідчить про загальні закономірності полірування всіх класів твердих тіл – діелектриків, напівпровідників і провідників.

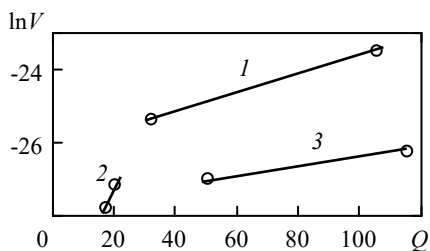


Рис. 3. Залежність швидкості знімання оброблюваного матеріалу від добротності мікрорезонатора: 1 – К8, ПММА; 2 – Ge, InSb; 3 – мідь.

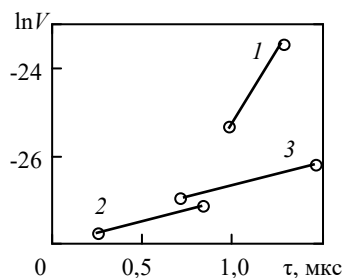


Рис. 4. Залежність швидкості знімання оброблюваного матеріалу від часу життя збудженого стану кластерів чи квантових точок обробленої поверхні: 1 – К8, ПММА; 2 – Ge, InSb; 3 – мідь.

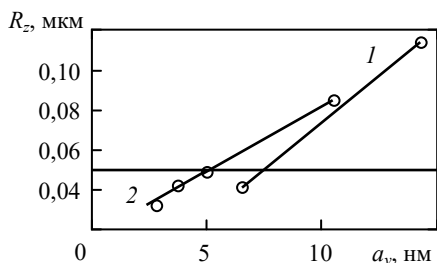


Рис. 5. Залежність параметра R_z шорсткості полірованих поверхонь деталей оптотехніки від найбільш ймовірного розміру наночастинок шламу a_v : 1 – K8, ПММА; 2 – Ge, InSb, Cu.

загальних закономірностей полірування [27, 32–34, 74]. Наведені на рис. 5 залежності параметра R_z шорсткості полірованих поверхонь деталей оптотехніки від найбільш ймовірного розміру наночастинок шламу a_v (пряма 1 для K8 і ПММА; пряма 2 для Ge, InSb і Cu) дозволяють зробити висновок, що використання дисперсних систем ДС2 і ДС2* на основі полірувальних порошків двооксиду церію для полірування ПММА і міді є недоцільним, оскільки вимоги, які висувуються до полірованих оптичних поверхонь не задовольняються ($R_z > 0,05$ мкм). Це означає, що параметри шорсткості полірованих поверхонь R_a , R_q , R_{max} і R_z разом зі швидкістю знімання оброблюваного матеріалу можна використовувати в якості критерію оцінки ефективності полірування діелектриків, напівпровідників і провідників.

Під час експериментальної перевірки наведених результатів показано, що теоретично розраховані значення швидкості знімання оброблюваного матеріалу під час полірування оптичного скла марки K8, поліметилметакрилату, германію, антимоніду індію і міді за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування (табл. 2). Незначне відхилення розрахункових і експериментальних даних, яке складало 2–5 %, свідчить, що під час полірування деталей оптотехніки, яке відбувається 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 FRET у випадку скла (K8, ПММА), або QD-FRET, опосередкованого квантовими точками, які утворюються на поверхнях напівпровідників (Ge-QDs, InSb-QDs) і міді (CuO-QDs, Cu₂O-QDs).

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження закономірностей знімання оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю полірованої поверхні під час полірування деталей оптотехніки з діелектричних, напівпровідникових і провідних матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків встановлено, що утворення і видалення наночастинок шламу внаслідок передачі енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні, відбувається за механізмом FRET у випадку скла (K8, ПММА), або QD-FRET, опосередкованого квантовими точками, які утворюються на поверхнях напівпровідників (Ge-QDs, InSb-QDs) і міді (CuO-QDs, Cu₂O-QDs). Показано, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу зменшується за підвищення енергії зв'язку скла, або ефективної ширини забороненої зони квантових точок на-

півпровідників чи оксидів міді, які утворюються на її поверхні, а залежності енергії наночастинок шламу від їхнього найбільш ймовірного розміру описуються лінійною функцією для К8 і ПММА або параболічною функцією для Ge, InSb і міді.

Встановлено, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу під час полірування деталей оптотехніки з оптичного скла К8, поліметилметакрилату, германію, антимоніду індію і міді за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків лінійно зростає за підвищення добротності мікрорезонатора і часу життя збудженого стану кластерів чи квантових точок оброблюваної поверхні відповідно до загальних закономірностей процесу полірування. Показано, що в якості критерію оцінки ефективності полірування доцільно використовувати параметри шорсткості полірованих поверхонь Ra , Rq , R_{max} і Rz разом зі швидкістю знімання оброблюваного матеріалу. Показано також, що результати теоретичного розрахунку швидкості знімання оброблюваного матеріалу добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування діелектричних матеріалів, напівпровідникових кристалів і міді за відхилення 2–5 %.

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, I. A. Rybalka²

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

Polishing of optical components made of glass,
semiconductors and copper

As a result of studying the regularities of the removal of the processed material and the formation of the nanopile of the polished surface during the polishing of optical components made of glass, semiconductors and copper using dispersed systems of micro- and nanopowders, it was found that the formation of sludge nanoparticles due to the transfer of energy from the polishing powder particles to the processed surface occurs by the FRET mechanism in the case of glass, or QD-FRET, mediated by quantum dots formed on the surfaces of semiconductors and copper. It is shown that the removal rate of the processed material decreases with an increase in the binding energy of the glass, or the effective band gap of quantum dots of semiconductors or copper oxides formed on its surface. The dependences of the energy of sludge nanoparticles on their most probable size are described by a linear function for K8 and PMMA or a parabolic function for Ge, InSb and copper. It has been established that the removal rate of the processed material during the polishing of optical parts made of K8 optical glass, polymethyl methacrylate, germanium, indium antimonide and copper linearly increases with increasing the quality factor of the microresonator and the lifetime of the excited state of clusters or quantum dots of the processed surface in accordance with the general laws of polishing. It is shown that the roughness parameters of the polished surfaces Ra , Rq , R_{max} and Rz together with the removal rate of the processed material can be used as a criterion for assessing the effectiveness of polishing. It is also shown 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 polishing performance of glass, semiconductor crystals and copper a deviation of 2–5%.

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

1. Поперенко Л.В., Стащук В.С. Основи фізики матеріалів оптотехніки: Навчальний посібник. Київ: ВПЦ “Київський університет”, 2011. 686 с.
2. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Ковальов С.В. Фізичні засади формування прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів. Київ: Наук. думка, 2017. 248 с.
3. Filatov Yu.D. Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing. In: Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining, Springer Tracts in Mechanical Engineering / eds. J. Zhang, B. Guo, J. Zhang. Singapore: Springer, 2019. P. 129–165.
4. 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.
5. Liu X., Liu Y., Liang Y., Zhao Z., Gao B. Kinetics model incorporating both the chemical and mechanical effects on material removal for copper chemical mechanical polishing. *Microelectron. Eng.* 2012. Vol. 91. P. 19–23
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. Hazarika J., Patil C.S., Rajaraman P.V. Formulation of slurry for chemical mechanical polishing of Cu substrates. *Mater. Today: Proc.* 2021. Vol. 39. P. 1781–1785.
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. Filatov Yu.D. Polishing of aluminosilicate materials with tools with bound polishing powder. *Sverkhtverdye Materialy.* 2001. no. 3. P. 36–49.
11. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
12. 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.
13. 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.
14. Filatov Yu.D. Quantum mechanism of optical glass polishing. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 4. P. 303–313.
15. Mathur V., Sharma K. Thermal response of polystyrene/poly methyl methacrylate (PS/PMMA) polymeric blends. *Heat Mass Transfer.* 2016. Vol. 52. P. 2901–2911.
16. Levytskyj V., Laruk Yu., Humenetsky T., Sikora J. The influence of polystyrene modifier and plasticizer nature on the properties of poly(vinyl chloride). *Chem. Chem. Technol.* 2015. Vol. 9, no. 2. P. 199–203.
17. Zhang H.Q., Jin Y., Qiul Y. The optical and electrical characteristics of PMMA film prepared by spin coating method. *Global Conf. Polymer Composite Mater. (PC M 2015), IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.* 2015. Vol. 87. P. 1–5.
18. Filatov Yu.D. Material removal rate in polishing polymethymethacrylate parts. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 3. P. 212–220.
19. Joya M.R., Pizani P.S., Jasinevicius R.G., Samad R.E., de Rossi W., Vieira Jr. N.D. Raman scattering investigation on structural and chemical disorder generated by laser ablation and mechanical microindentations of InSb single crystal. *J. Appl. Phys.* 2006. Vol 100, art. 053518.
20. Pandya S.G., Kordesch M.E. Characterization of InSb nanoparticles synthesized using inert gas condensation. *Nanoscale Res. Lett.* 2015. Vol. 10:258. P. 1–7.

21. 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.
22. 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.
23. Aronson J.R., McLinden H.G., Gielisse P.J. Low-temperature far-infrared spectra of germanium and silicon. *Phys. Rev.* 1964. Vol. 135, no. 3A. P. A785–A788.
24. Filatov Yu.D., Boyarintsev A.Y., Kolesnikov O.V., Galkin S.M., Novgorodtsev V.O., Polupan Ya.I., Pylypenko O.I., Sidorko V.I., Kovalev S.V. Polishing of optoelectronics parts from semiconductor materials. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no 2. P. 125–136.
25. Бовсуновський А.П. Електротехнічні матеріали: Корот. довідник. Київ: НУХТ, 2012. 36 с.
26. Voitsenya V.S., Kononov V.G., Becker M.F., Motojima O., Narihara K., Schunke B. Materials selection for the in situ mirrors of laser diagnostics in fusion devices. *Rev. Sci. Instrum.* 1999. Vol. 70, no. 4. P. 2016–2025.
27. Filatov Yu.D., Boyarintsev A.Yu, Sidorko V.I., Kovalev S.V., Kolesnikov O.V. Polishing of polystyrene scintillators. *Funct. Mater.* 2023. Vol. 30, no. 3. P. 424–430.
28. Babitha K.K., Sreedevi A., Priyanka K.P., Sabu B., Varghese T. Structural characterization and optical studies of CeO₂ nanoparticles synthesized by chemical precipitation. *Indian J. Pure & Appl. Phys.* 2015. Vol. 53. P. 596–603.
29. Murarka S.P., Eizenberg M., Sinha A.K., Interlayer dielectrics for semiconductor technologies. elsevier academic press. 2003. 444 p.
30. 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.
31. Mukherjee D., Rao B.G., Reddy B.M. Characterization of ceria-based nano-oxide catalysts by raman spectroscopy. *Topics in Catalysis.* 2017. Vol. 60, nos. 19–20. P. 1673–1681.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. 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.

44. 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.
45. Joya M.R., Pizani P.S., Jasinevicius R.G., Samad R.E., de Rossi W., Vieira Jr. N.D. Raman scattering investigation on structural and chemical disorder generated by laser ablation and mechanical microindentations of InSb single crystal. *J. Appl. Phys.* 2006. Vol. 100, art. 053518.
46. Aronson J.R., McLinden H.G., Gielisse P.J. Low-temperature far-infrared spectra of germanium and silicon. *Phys. Rev.* 1964. Vol. 135, no. 3A. P. A785–A788.
47. Sutherland G.B.B.M. Some comments on the infrared spectra of diamond, silicon, and germanium. *J. Opt. Soc. Am.* 1960. Vol. 50, no. 12. P. 1201–1203.
48. Deinzer G., Strauch D. Two-phonon infrared absorption spectra of germanium and silicon calculated from first principles. *Phys. Rev. B.* 2004. Vol. 69, art. 045205.
49. Zhang Z., Cui J., Zhang J., Liu D., Yu Z., Guo D. Environment friendly chemical mechanical polishing of copper. *Appl. Surf. Sci.* 2019. Vols. 467–468. P. 5–11.
50. Zhoua J., Niua X., Yanga C., Huoa Z., Lua Y., Wanga Z., Cuia Y., Wanga R. Surface action mechanism and planarization effect of sarcosine as an auxiliary complexing agent in copper film chemical mechanical polishing. *Appl. Surf. Sci.* 2020. Vol. 529, art. 147109.
51. Liu D., Zhang Z., Feng J., Yu Z., Meng F., Shi Ch., Xu G., Shi Sh., Liu W. Environment-friendly chemical mechanical polishing for copper with atomic surface confirmed by transmission electron microscopy. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2023. Vol. 656, Part B, no. 5, art. 130500.
52. Поперенко Л.В. Оптичні властивості опромінених металевих дзеркал: Монографія. Київ: Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”, 2005. 174 с.
53. Neeli Ch., Sarika K.S., Manikanta B., Swapna S.N. Structural and optical properties of copper nanoparticles synthesized via wet chemical route. *Proc. Internat. Conf. Physics of Materials and Nanotechnology ICPN 2019. AIP Conf. Proc.* 2020. Vol. 2244, art. 070020.
54. Amaliyah S., Pangesti D.P., Masruri M., Sabarudin A., Sumitro S.B. Green synthesis and characterization of copper nanoparticles using Piper retrofractum Vahl extract as bioreductor and capping agent. *Heliyon.* 2020. Vol. 6, no. 8. art. e04636.
55. Moniri S., Ghoranneviss M., Hantehzadeh M. R., Asadabad M. A. Synthesis and optical characterization of copper nanoparticles prepared by laser ablation. *Bull. Mater. Sci.* 2017. Vol. 40, no. 1. P. 37–43.
56. Pandit R., Gaikwad S., Rai M. Biogenic fabrication of CuNPs, Cu bioconjugates and in vitro assessment of antimicrobial and antioxidant activity. *IET Nanobiotechnology.* 2017. Vol. 11, no. 5. P. 568–575.
57. Yokhebed N., Ramelan A.H., Wahyuningsih S., Kawuri K.R. The synthesis of cuprous nanoparticles using chemical reduction method. *J. Phys. Conf. Ser.* 2022. Vol. 2190. art. 012038.
58. Matei A., Craciun G., Romanitan C., Pachiu C., Tucureanu V. Biosynthesis and characterization of copper oxide nanoparticles. *Eng. Proc.* 2023. Vol. 37, no. 54, art. 14629.
59. Kayani Z.N., Umer M., Riaz S., Naseem S. Characterization of copper oxide nanoparticles fabricated by the sol–gel method. *J. Electronic Mater.* 2015. Vol. 44. P. 3704–3709.
60. Mohamed E.A. Green synthesis of copper & copper oxide nanoparticles using the extract of seedless dates. *Heliyon.* 2020. Vol. 6, no. 1, art. e03123.
61. Jayakumar G., Irudayaraj A.A., Raj A.D. Particle size effect on the properties of cerium oxide (CeO₂) nanoparticles synthesized by hydrothermal method. *Mech. Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. 9. art. 01499374.
62. Yin M., Wu C.-K., Lou Y., Burda C., Koberstein J.T., Zhu Y., O'Brien S. Copper oxide nanocrystals. *J. Am. Chem. Soc.* 2005. Vol. 127, no. 26. P. 9506–9511.
63. Khan A., Rashid A., Younas R., Chong R. A chemical reduction approach to the synthesis of copper nanoparticles. *Int. Nano Lett.* 2015. Vol. 6, no. 1. P. 21–26.
64. Tahir D., Tougaard S. Electronic and optical properties of Cu, CuO and Cu₂O studied by electron spectroscopy. *J. Phys.: Condens. Matter.* 2012. Vol. 24, art. 175002.
65. Lee M.Y., Kim S.-H., Park I.-K. Cu₂O quantum dots emitting visible light grown by atomic layer deposition. *Physica B: Condens. Matter.* 2016. Vol. 500. P. 4–8.
66. Vaseem M., Hong A.-R., Kim R.-T., Hahn Y.-B. Copper oxide quantum dot ink for inkjet-driven digitally controlled high mobility field effect transistors. *J. Mater. Chem. C.* 2013. Vol. 1, no. 11. P. 2112–2121.

67. Rathod K.N., Savaliya C., Babiya K.R., Vasvani S.H., Ramani R.V., Ramani B.M., Joshi A.D., Pandya D., Shah N.A., Markna J.H. Preparation of CuO quantum dots by cost-effective ultrasonication technique. *Int. J. Nanosci.* 2017. Vol. 16, no. 05n06. art. 1750019.
68. Lai D., Liu T., Gu X., Chen Y., Niu J., Yi L., Chen W. Suspension synthesis of surfactant-free cuprous oxide quantum dots. *J. Nanomaterials*. 2015. Vol. 2015, art. 825021.
69. Tang D., Xu D., Luo Z., Ke J., Zhou Y., Li L., Sun J. Highly dispersion Cu₂O QDs decorated Bi₂WO₆ S-scheme heterojunction for enhanced photocatalytic water oxidation. *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. P. 2455–2463.
70. Karunarathna P.G.D.C.K., Samarakoon S.P.A.U.K., Fernando C.A.N. Explanation of the photocurrent generation of Cu₂O quantum dots (QDs) sensitized p-CuSCN stable photoelectrochemical cells. *Materials Research Express*. 2018. Vol. 5, no. 1, art. 015005.
71. Tian H., Liu Q., Hu A., Guo X. Research on in-situ oxidation of the copper covered by graphene. *Proc. SPIE*. 2020. Vol. 11567, art. 1156726.
72. 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.
73. 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, no. 17. P. 5754–5767.
74. 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.
75. 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 02.12.24

Після доопрацювання 17.12.24

Прийнята до опублікування 20.12.24