

УДК 621.923.7

**Ю. Д. Філатов^{1,*}, А. Ю. Бояринцев², О. В. Колесніков²,
С. М. Галкін², В. О. Новгородцев², Я. І. Полупан²,
О. І. Пилипенко², 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, м. Київ, Україна

*filatov2045@gmail.com

Полірування деталей оптичної техніки з напівпровідникових матеріалів

В результаті дослідження механізму знімання оброблюваного матеріалу і зношування частинок дисперсної фази дисперсної системи під час полірування напівпровідникових матеріалів встановлено, що утворення наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку є наслідком QD-FRET – ферстерівського резонансного перенесення енергії, опосередкованого квантовими точками, які утворюються на поверхнях оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку. Показано, що енергія, яка переноситься між частинками полірувального порошку і оброблюваною поверхнею, а також енергія наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку параболічно залежать від їхніх найбільш ймовірних розмірів, які є взаємопов'язаними з ефективною шириною забороненої зони квантової точки (КТ). Встановлено, що швидкість знімання матеріалу та інтенсивність зношування полірувального порошку експоненціально спадають зі збільшенням ефективної ширини забороненої зони КТ на відповідних поверхнях, а їхнє відношення, яке характеризує ефективність застосування дисперсної системи з мікро- і нанопорошків для полірування напівпровідникових матеріалів, лінійно зростає зі зменшенням співвідношення ефективних ширин забороненої зони, характерних для КТ на оброблюваній поверхні і на поверхні частинок полірувального порошку. Показано, що результати теоретичного розрахунку швидкості знімання матеріалу добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування кристалів InSb, SiC і Ge за відхилення 4–5 %.

Ключові слова: полірування, напівпровідники, квантові точки, ферстерівське резонансне перенесення енергії, опосередковане КТ (QD-FRET), швидкість знімання матеріалу, інтенсивність зношування полірувального порошку.

© Ю. Д. ФІЛАТОВ, А. Ю. БОЯРИНЦЕВ, О. В. КОЛЕСНИКОВ, С. М. ГАЛКІН, В. О. НОВГОРОДЦЕВ, Я. І. ПОЛУПАН,
О. І. ПИЛИПЕНКО, В. І. СІДОРКО, С. В. КОВАЛЬОВ, 2025

ВСТУП

Полірування деталей оптотехніки з напівпровідникових матеріалів, які широко використовують в якості лінз, призм, вікон, датчиків і детекторів, фоточутливих в ІЧ-діапазоні, підкладинок для світлодіодів, матриць для дзеркальних елементів оптотехніки, елементів для приладів нічного бачення, детекторів іонізуючого випромінювання, ІЧ-фільтрів, сонячних батарей, а також квантових точок для ІЧ-оптики, медицини, космічної техніки, радіології та радіохімії [1–3], здійснюють за методом притирання полірувальними дисперсними системами з мікро- і нанопорошків і реалізують за допомогою шліфувальних і полірувальних верстатів різних типів та моделей [4–6].

Швидкість знімання оброблюваного матеріалу та інтенсивність зношування полірувального порошку, які залежать від їхніх фізико-хімічних властивостей, режимних і кінематичних параметрів процесу обробки, визначають ефективність процесу полірування [5, 7, 8]. Однак до теперішнього часу механізм утворення наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира під час полірування напівпровідникових матеріалів остаточно не з'ясовано. Саме тому дослідження закономірностей утворення наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку під час полірування напівпровідникових матеріалів за допомогою дисперсійних систем з мікро- і нанопорошків є актуальними.

Метою роботи є дослідження механізму знімання оброблюваного матеріалу і зношування частинок полірувального порошку під час полірування напівпровідникових матеріалів за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків.

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження закономірностей утворення наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку здійснювали стосовно полірування плоских поверхонь деталей діаметром 60 мм з напівпровідникових матеріалів на верстаті мод. 2ШП-200М за допомогою притира з пінополіуретану діаметром 100 мм за зусилля притискання деталі до притира 50 Н, частоти обертання притира 90 об/хв, зміщення 30 мм та довжини штриха 80 мм, середньої температури в зоні контакту оброблюваної деталі та притира 298 К. Оброблювали деталі з антимоніду індію (InSb, 6 елементів, 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 $a = 0,648 \text{ нм}$) [9–11], карбіду кремнію (6H-SiC, 17 елементів, загальна площа – $10,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, густина – $3,217 \text{ г/см}^3$, статична діелектрична проникність – 6,5, ширина забороненої зони $E_g = 2,9 \text{ еВ}$, параметри кристалічної ґратки $a = 0,3081 \text{ нм}$, $c = 1,512 \text{ нм}$) [11–14], германію (Ge, 2 елементи, загальна площа $20,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, густина – $5,323 \text{ г/см}^3$, статична діелектрична проникність – 16, ширина забороненої зони $E_g = 0,66 \text{ еВ}$, параметр кристалічної ґратки $a = 0,566 \text{ нм}$) [1–3, 15], телуриду кадмію (CdTe, густина $5,855 \text{ г/см}^3$, статична діелектрична проникність 10,2, ширина забороненої зони $E_g = 1,5 \text{ еВ}$, параметр кристалічної ґратки $a = 0,648 \text{ нм}$) [16–18], селеніду кадмію (CdSe, густина $5,82 \text{ г/см}^3$, статична діелектрична проникність 9,7, ширина забороненої зони $E_g = 1,74 \text{ еВ}$, параметри кристалічної ґратки: гексагональна сингонія $a = 0,439 \text{ нм}$, $c = 0,702 \text{ нм}$, кубічна сингонія $a = 0,6084 \text{ нм}$) [18–21]. Полірування здійснювали за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків (густина – $3,86 \text{ г/см}^3$, статична діелектрична проникність – 6,1, ширина забо-

роненої зони $E_g = 3,62$ eV, параметри кристалічної ґратки $a = 1,148$ нм, $c = 0,562$ нм) [6, 8, 22].

Визначення розмірів та аналіз поверхні частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи здійснювали за зображеннями, отриманими за допомогою растрового електронного мікроскопу Zeiss EVO50 з системою мікроаналізу AZtec. Середній розмір частинок полірувального порошку складав 400 нм (рис. 1). Знімання

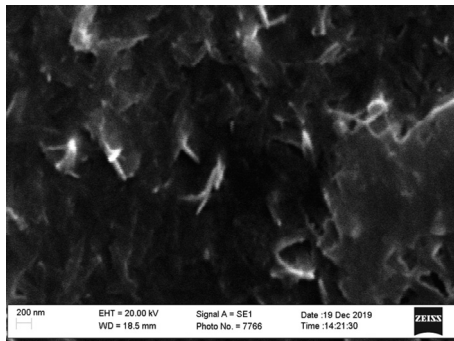


Рис. 1. Полірувальна дисперсна система з мікрота нанопорошків.

оброблюваного матеріалу визначали ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. ВЛР-200 в мг/хв. Підготовку плоских поверхонь деталей оплотехніки під полірування здійснювали за допомогою традиційних методів тонкого та надтонкого шліфування [4, 23].

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) між ними [22, 24–29], що відбуваються у відкритому мікрорезонаторі, який утворено поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку [22, 30–32]. Резонансне перенесення енергії від дисперсної системи до оброблюваного матеріалу, яке приводить до утворення наночастинок шламу оброблюваного матеріалу, відбувається на характерних частотах, які визначаються за спектрами поглинання і комбінаційного розсіювання світла та характеризуються енергіями E_{2m} і E_{1m} . Співвідношення цих енергій визначає кількість молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваної поверхні $\xi_{1m} = E_{1m}^4 / (E_{2m}^2 - E_{1m}^2)^2$ і полірувального порошку $\xi_{2m} = E_{2m}^4 / (E_{2m}^2 - E_{1m}^2)^2$ та їхню енергію, яка може набувати дискретних значень $E_{1m}(n_1) = 2\mu_1 E_{k01} \left(n_1 + \frac{1}{2} \right)$ і $E_{2m}(n_1) = 2\mu_1 E_{k02} \left(n_1 + \frac{1}{2} \right)$, де

$\mu_1 = \frac{E_{bm}}{E_{1m}(0)}$ – нормований коефіцієнт; E_{bm} – енергія зв'язку оброблюваного

матеріалу; $E_{k01} = E_{1m} \cdot \xi_{1m}$; $E_{k02} = E_{2m} \cdot \xi_{2m}$; $n_1 = \overline{0, N_1 - 1}$ і N_1 – номери та кількість квантових переходів. Ймовірність утворення наночастинок шламу описується функцією розподілу Пуассона за площами їхньої поверхні $P(n_1, v)$ з параметром $v = 1$, найбільш ймовірний розмір $a_m = \sum_{n_1} d_1(n_1) P(n_1, v)$ ($d_1(n_1)$ –

розміри наночастинок шламу) залежить від ξ_{1m} , а їхня енергія визначається

різницею енергії $E_{Tm} = \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \left[E_{k02} \left(n_1 + \frac{1}{2} \right) - E_{k01}(0) \right]$, яка переноситься під час

FRET, і енергії зв'язку оброблюваного матеріалу E_{bm} за формулою $E_m = E_{Tm} - E_{bm}$.

Резонансне перенесення енергії від оброблюваного матеріалу до дисперсної системи приводить до утворення наночастинок зносу полірувального порошку і відбувається під час переходів між рівнями, які характеризуються енергіями E_{1p} і E_{2p} , співвідношення яких визначає кількість молекулярних

фрагментів в кластерах на поверхні частинок полірувального порошку $\xi_{2p} = E_{2p}^4 / (E_{1p}^2 - E_{2p}^2)^2$ і на оброблюваній поверхні $\xi_{1p} = E_{1p}^4 / (E_{1p}^2 - E_{2p}^2)^2$ та їхню енергію $E_{1p}(n_2) = 2\mu_2 E_{c01} \left(n_2 + \frac{1}{2} \right)$ і $E_{2p}(n_2) = 2\mu_2 E_{c02} \left(n_2 + \frac{1}{2} \right)$, де

$\mu_2 = \frac{E_{bp}}{E_{1p}(0)}$ – нормований коефіцієнт, E_{bp} – енергії зв'язку полірувального

порошку; $E_{c01} = E_{1p} \cdot \xi_{1p}$, $E_{c02} = E_{2p} \cdot \xi_{2p}$, $n_2 = \overline{0, N_2 - 1}$ і N_2 – номери та кількість квантових переходів. Найбільш ймовірний розмір наночастинок зносу полірувального порошку a_p залежить від ξ_{2p} , а їхня енергія визначається різницею

енергій $E_{Tp} = \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \left[E_{c02} \left(n_2 + \frac{1}{2} \right) - E_{c01}(0) \right]$, яка переноситься під час FRET, і

енергії зв'язку полірувального порошку E_{bp} за формулою $E_p = E_{Tp} - E_{bp}$.

Швидкість знімання оброблюваного матеріалу V_m і інтенсивність зношування полірувального порошку V_p , які залежать від розстроювання енергій $\delta E_m = E_{2m} - E_{1m}$ і $\delta E_p = E_{1p} - E_{2p}$ та добротності мікрорезонатора $Q_m = E_{1m} / (E_{2m} - E_{1m})$ і $Q_p = E_{2p} / (E_{2p} - E_{1p})$, визначаються у відповідності до формул [7, 22, 24, 33]:

$$V_{m,p} = \frac{L_t u}{d} \eta_{m,p} \tau_{m,p} Q_{m,p}, \quad (1)$$

де $\eta_{m,p}$ – коефіцієнти об'ємного зносу [4, 7, 22, 34]; L_t – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні; d – розмір частинки полірувального порошку; τ_m – час життя кластерів оброблюваної поверхні у збудженому стані; τ_p – час життя кластерів на поверхні частинки полірувального порошку у збудженому стані; u – швидкість відносного переміщення деталі та притира.

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження механізму видалення оброблюваного матеріалу і зношування частинок полірувального порошку під час полірування напівпровідникових матеріалів за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків здійснювали з врахуванням того, що в результаті FRET від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні і від оброблюваної поверхні до частинок полірувального порошку, яке відбувається під час екситон-фононних переходів поблизу їхнього довгохвильового краю поглинання, енергія наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку залежить не від енергій зв'язку E_{bm} і E_{bp} , а від ширини забороненої зони E_g оброблюваного матеріалу і полірувального порошку [1–3], а енергії кластерів на їхніх поверхнях визначаються за умови мінімуму розстроювання енергій δE_m і δE_p .

За раманівськими спектрами розсіювання світла і спектрами ІЧ-поглинання для оброблюваних напівпровідникових матеріалів і полірувальної дисперсної системи, відомими з літературно-інформаційних джерел [1–3, 9, 12, 15–20, 35, 36], було визначено значення частот коливань молекулярних фрагментів кластерів на поверхні напівпровідника і на поверхні частинки полірувального порошку – ν_{1m} , ν_{2m} , ν_{1p} , ν_{2p} , і спектрального розділення $\delta \nu_m = \nu_{2m} - \nu_{1m}$ і $\delta \nu_p = \nu_{1p} - \nu_{2p}$, а також відповідних енергій: E_{1m} , E_{2m} , E_{1p} , E_{2p} і розстроювання енергій $\delta E_m = E_{2m} - E_{1m}$ і $\delta E_p = E_{1p} - E_{2p}$ (табл. 1, 2).

Визначення розмірів наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку здійснювали за припущення, що вони мають форму паралеле-

лепіпедів, яка зумовлює утворення нанорозмірного рельєфу полірованих поверхонь у вигляді терасно-східчастої структури [37, 38]. За розмірами паралелепіпедів і параметрами кристалічної ґратки оброблюваного матеріалу і полірувального порошку було визначено кількість елементарних комірок ξ_{1m} і ξ_{2p} , з яких складаються кластери на оброблюваній поверхні і на поверхні частинок полірувального порошку, та найбільш ймовірні розміри наночастинок шламу (a_m) і наночастинок зносу полірувального порошку (a_p), які утворюються в результаті FRET.

Результати розрахунку параметрів взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою і розміру наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку наведено в табл. 1, 2.

Таблиця 1. Розміри наночастинок шламу

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою	Оброблюваний матеріал				
	InSb	SiC	Ge	CdTe	CdSe
Частота ν_{1m} , см ⁻¹	140,0	788,0	300,0	140,0	201,4
Частота ν_{2m} , см ⁻¹	147,0	850,0	318,0	150,0	213,0
Спектральне розділення $\delta\nu_m$, см ⁻¹	7,0	62,0	18,0	10,0	11,6
Енергія E_{1m} , меВ	17,38	97,81	37,24	17,38	25,00
Енергія E_{2m} , меВ	18,25	105,51	39,47	18,62	26,44
Розстроювання енергії δE_m , меВ	0,87	7,70	2,23	1,24	1,44
Кількість елементарних комірок ξ_{1m}	95	37	65	45	71
Найбільш ймовірний розмір наночастинок шламу a_m , нм	3,7	2,5	2,8	4,0	3,1 (3,0)*

*CdSe-cub (CdSe-gex).

Таблиця 2. Розміри наночастинок зносу полірувального порошку

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою	Оброблюваний матеріал				
	InSb	SiC	Ge	CdTe	CdSe
Частота ν_{1p} , см ⁻¹	154,0	766,0	343,0	159,0	201,4
Частота ν_{2p} , см ⁻¹	150,0	733,0	333,0	150,0	190,0
Спектральне розділення $\delta\nu_p$, см ⁻¹	4,0	33,0	10,0	9,0	11,4
Енергія E_{1p} , меВ	19,12	95,08	42,58	19,74	25,00
Енергія E_{2p} , меВ	18,62	90,98	41,33	18,62	23,58
Розстроювання енергії δE_p , меВ	0,50	4,10	1,24	1,12	1,42
Кількість елементарних комірок ξ_{2p}	342	117	269	65	65
Найбільш ймовірний розмір наночастинок зносу полірувального порошку a_p , нм	8,8	6,3	8,3	7,0	7,0

Аналіз розмірів наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку, які утворились в результаті переходів відповідних кластерів на оброблюваній поверхні і на поверхні частинок полірувального порошку із зв’язаного стану у вільний, показує, що вони характеризуються значеннями $a_m \approx 2,5\text{--}4,0$ нм і $a_p \approx 6,3\text{--}8,8$ нм. Це означає, що ці наночастинки є квантови-

ми точками (КТ), що складаються з десятків–сотень атомів, розміри яких (1–10 нм) [1, 3, 18, 21, 39–42] не перевищують характерного борівського радіуса екситону в даному напівпровіднику, який визначають за формулою [43]

$$r_B = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon\hbar^2}{\mu e^2},$$

де $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму; ϵ – статична діелектрична проникність напівпровідника; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд електрона; μ – ефективна маса екситону.

Виходячи з оцінки ефективної маси екситону, за якою $\mu = 0,116 m_e$ для InSb; $\mu \approx 0,1 m_e$ для SiC; $\mu \approx 0,25 m_e$ для Ge; $\mu = 0,081 m_e$ для CdTe; $\mu = 0,124 m_e$ для CdSe; $\mu \approx (0,03 - 0,04) m_e$ для полірувального порошку ($m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг маса електрону) [1, 2, 13, 44], було розраховано відповідні значення борівського радіуса екситону, що складали $r_B = 7,7$ нм для InSb, $r_B = 3,4$ нм для SiC, $r_B = 3,4$ нм для Ge, $r_B = 6,9$ нм для CdTe, $r_B = 4,1$ нм для CdSe, $r_B = 9,2$ нм для полірувального порошку.

Вказане дозволяє стверджувати, що під час полірування напівпровідникових матеріалів замість звичайного FRET між рівнями енергії донорно-акцепторних пар на поверхнях оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку відбувається ферстерівське резонансне перенесення енергії, опосередковане квантовими точками (QD-FRET) [45–50], які утворюються на цих поверхнях і перетворюються в наночастинки шламу і наночастинки зносу полірувального порошку. Врахування квантово-розмірного ефекту, що полягає в залежності ефективної ширини забороненої зони КТ від енергії першого екситонного максимуму поблизу довгохвильового краю поглинання і розміру a КТ у відповідності до формули

$$E_{gqd} = E_g + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2\mu a^2}, \tag{2}$$

дозволило визначити ефективну ширину забороненої зони E_{gqd} в залежності від найбільш ймовірних розмірів наночастинок шламу a_m і наночастинок зносу полірувального порошку a_p , енергії, які переносяться під час QD-FRET між частинками полірувального порошку і оброблюваною поверхнею E_{Tm} і E_{Tp} , а також енергії наночастинок шламу E_m і наночастинок зносу полірувального порошку E_p (табл. 3, 4).

Таблиця 3. Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою і швидкість знімання оброблюваного матеріалу під час полірування

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою	Оброблюваний матеріал				
	InSb	SiC	Ge	CdTe	CdSe
Ширина забороненої зони E_{gqd} , eВ	0,41	3,05	0,86	1,79	2,06 (2,09)*
Енергія QD-FRET E_{Tm} , eВ	2,55	6,93	4,05	3,85	2,93
Енергія наночастинок шламу E_m , eВ	2,14	3,88	3,19	2,06	0,87 (0,84)*
Добротність мікрорезонатора Q_m	20,0	12,7	16,7	14,0	17,4
Час життя збудженого стану КТ оброблюваної поверхні τ_m , нс	835	84	257	205	240
Коефіцієнт об'ємного зносу η_m , 10^{-12} м ² /с	1,1	0,8	1,4	2,7	1,8 (1,7)*
Швидкість знімання оброблюваного матеріалу V_m , 10^{-13} м ³ /с	16,7	2,0	8,8	16,8	16,6 (15,7)*

*CdSe-cub (CdSe-gex).

Таблиця 4. Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою і інтенсивність зношування полірувального порошку під час полірування

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою	Оброблюваний матеріал				
	InSb	SiC	Ge	CdTe	CdSe
Ширина забороненої зони E_{gqd} , eB	3,76	3,89	3,76	3,84	3,84
Енергія QD-FRET E_{Tp} , eB	8,2	16,0	14,6	5,5	6,9
Енергія наночастинки зносу полірувального порошку E_p , eB	4,4	12,1	10,8	1,6	3,1
Добротність мікрорезонатора Q_p	37,5	22,2	33,3	16,7	16,7
Час життя збудженого стану КТ частинки полірувального порошку τ_p , нс	332	107	209	129	152
Коефіцієнт об'ємного зносу η_p , 10^{-12} м ² /с	5,8	2,2	4,1	4,2	3,9
Інтенсивність зношування полірувального порошку V_p , 10^{-13} м ³ /с	65,8	11,7	41,5	19,6	21,8

За припущення, що утворення наночастинок шламу оброблюваного матеріалу і наночастинок зносу полірувального порошку є наслідком QD-FRET, яке відбувається в одномодовому режимі, на основі методики [7, 22, 24, 33, 51–54] у відповідності до формули (1) було розраховано добротності мікрорезонатора Q_m і Q_p , коефіцієнти об'ємного зносу η_m і η_p , часи життя квантових точок на оброблюваній поверхні τ_m і на поверхні частинок полірувального порошку τ_p у збудженому стані, а також швидкість знімання оброблюваного матеріалу V_m і інтенсивність зношування полірувального порошку V_p (див. табл. 3, 4).

В результаті аналізу даних, наведених в табл. 1–4, встановлено, що під час полірування напівпровідникових матеріалів за допомогою полірувальної дисперсної системи з мікро- і нанопорошків енергія, яка переноситься під час QD-FRET між частинками полірувального порошку і оброблюваною поверхнею E_{Tm} і E_{Tp} , а також енергія наночастинок шламу E_m і наночастинок зносу полірувального порошку E_p нелінійно залежать від найбільш ймовірних розмірів наночастинок шламу a_m і наночастинок зносу полірувального порошку a_p . Наведена на рис. 2 залежність енергії E_{Tm} , яка переноситься під час QD-FRET від КТ на поверхні частинки полірувального порошку до КТ на оброблюваній поверхні, від розміру наночастинок шламу a_m , може бути апроксимована параболічною функцією

$$E_{Tm} = A_1(a_m - \alpha_1)^2 + \beta_1,$$

де $A_1 = 6,0$ eB/нм², $\alpha_1 = 3,4$ нм, $\beta_1 = 2,0$ eB. Залежності енергії E_{Tp} , яка переноситься під час QD-FRET від КТ на оброблюваній поверхні до КТ на поверхні частинки полірувального порошку, від розміру наночастинок зносу полірувального порошку a_p (рис. 3), характерні для полірування кристалів Ge і SiC (крива 1) і InSb, CdTe і CdSe (крива 2), можна апроксимувати параболічними функціями, що мають вигляд

$$E_{Tp} = A_2(a_p - \alpha_2)^2 + \beta_2,$$

$$\text{де } A_2 = \begin{cases} 0,5 \\ 1,2 \end{cases} \text{ eB/нм}^2; \alpha_2 = \begin{cases} 8,3 \\ 7,5 \end{cases} \text{ нм}; \beta_2 = \begin{cases} 14,2 \\ 6,0 \end{cases} \text{ eB}.$$

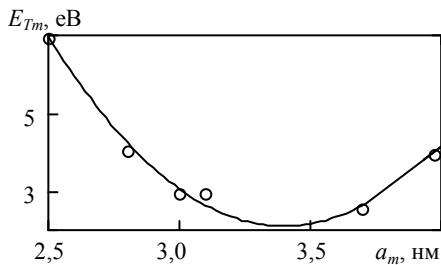


Рис. 2. Залежність енергії, що переноситься під час QD-FRET від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні E_{Tm} , від розміру наночастинок шламу a_m .

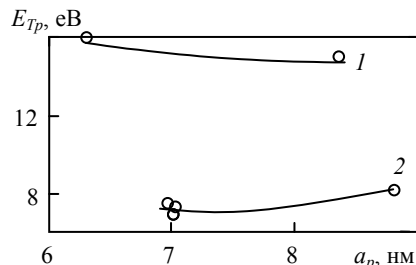


Рис. 3. Залежність енергії, яка переноситься під час QD-FRET від оброблюваної поверхні до частинок полірувального порошку E_{Tp} від розміру наночастинок шламу a_p : 1 – SiC і Ge; 2 – InSb, CdTe і CdSe.

Залежності енергії наночастинок шламу E_m і наночастинок зносу полірувального порошку E_p від найбільш ймовірних розмірів наночастинок шламу a_m і наночастинок зносу полірувального порошку a_p , що наведені на рис. 4 і 5, можна апроксимувати параболічними функціями, що відповідно мають наступний вигляд:

$$E_m = A_3(a_m - \alpha_3)^2 + \beta_3,$$

$$\text{де } A_3 = \begin{cases} 1,5 \\ 1,3 \end{cases} \text{ еВ/нм}^2; \alpha_3 = \begin{cases} 3,6 \\ 3,0 \end{cases} \text{ нм}; \beta_3 = \begin{cases} 2,2 \\ 0,9 \end{cases} \text{ еВ},$$

і

$$E_p = A_4(a_p - \alpha_4)^2 + \beta_4,$$

$$\text{де } A_4 = \begin{cases} 0,3 \\ 1,0 \end{cases} \text{ еВ/нм}^2; \alpha_4 = \begin{cases} 8,3 \\ 7,5 \end{cases} \text{ нм}; \beta_4 = \begin{cases} 10,6 \\ 2,3 \end{cases} \text{ еВ}.$$

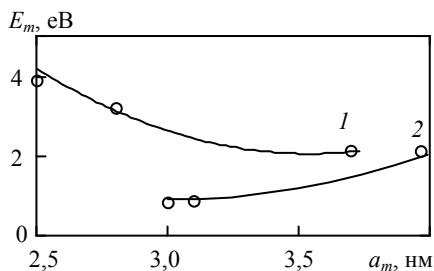


Рис. 4. Залежності енергії наночастинок шламу E_m від найбільш ймовірного розміру наночастинок шламу a_m : 1 – InSb, Ge і SiC; 2 – CdTe і CdSe.

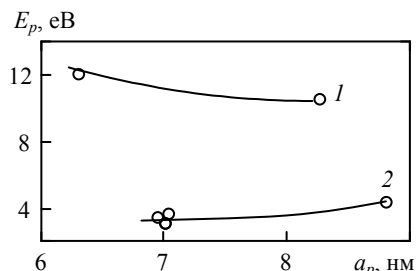


Рис. 5. Залежності енергії наночастинок зносу полірувального порошку E_p від найбільш ймовірного розміру наночастинок зносу полірувального порошку a_p : 1 – SiC і Ge; 2 – InSb, CdTe і CdSe.

Від енергії E_{Tm} і E_{Tp} , яка переноситься під час QD-FRET, залежать швидкість знімання оброблюваного матеріалу V_m та інтенсивність зношування полірувального порошку V_p [7, 24, 25, 33, 52], а енергія наночастинок шламу E_m і наночастинок зносу полірувального порошку E_p є визначальною у разі визначенні повного і диференціального перерізу розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку під час руху вздовж вісі резонатора, утвореного поверхнями оброблюваного матеріалу і притира,

а також вивченні закономірностей утворення і локалізації нальоту з цих наночастинок на оброблюваній поверхні і поверхні притира [54–57].

Нелінійність залежностей, наведених на рис. 2–5, пояснюється тим, що під час QD-FRET між частинками полірувального порошку і оброблюваною поверхнею утворюються наночастинки шламу і наночастинки зносу полірувального порошку, найбільш ймовірні розміри (a_m , a_p) яких залежать від розстроювання енергії (δE_m , δE_p), кількості елементарних комірок і ширини забороненої зони КТ, а також кількості квантових переходів (N_1 , N_2) між рівнями енергії донорно-акцепторних пар, що забезпечують подолання енергетичного бар'єру (E_{gqd}), одночасно визначають ефективну ширину забороненої зони КТ у відповідності до формули (2) [43].

На рис. 6 в напівлогарифмічному масштабі наведено залежності швидкості знімання оброблюваного матеріалу V_m і інтенсивності зношування полірувального порошку V_p від ефективної ширини забороненої зони E_{gqd} , характерної для КТ на оброблюваній поверхні (прямі 1 і 2) і на поверхні частинок полірувального порошку (пряма 3), які вказують на однаковий характер зношування оброблюваної поверхні і дисперсної фази дисперсної системи під час полірування та експоненціальне зменшення його інтенсивності за збільшення ефективної ширини забороненої зони КТ.

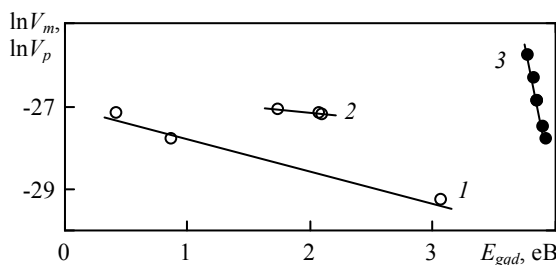


Рис. 6. Залежності швидкості знімання оброблюваного матеріалу V_m і інтенсивності зношування полірувального порошку V_p від ефективної ширини забороненої зони E_{gqd} : 1 – InSb, Ge і SiC; 2 – CdTe і CdSe.

Показано, що відношення швидкості знімання оброблюваного матеріалу V_m до інтенсивності зношування полірувального порошку V_p , яке характеризує ефективність застосування дисперсної системи з мікро- і нанопорошків для полірування кожного з розглянутих напівпровідникових матеріалів, лінійно зростає за зменшення співвідношення ефективних ширин забороненої зони, характерних для КТ на оброблюваній поверхні напівпровідника (E_{gqdm}) та на поверхні частинок полірувального порошку (E_{gqdp}) (рис. 7). Ефективність полірування напівпровідникових матеріалів зростає за зменшення їхньої ефективної ширини забороненої зони від карбиду кремнію до германію, антимоніду індію і халькогенідів кадмію.

Під час експериментальної перевірки наведених результатів показано, що теоретично розраховані значення швидкості

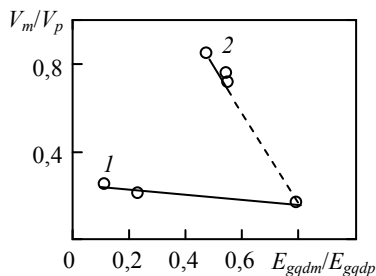


Рис. 7. Залежність відношення швидкості знімання оброблюваного матеріалу V_m до інтенсивності зношування полірувального порошку V_p від відношення ефективних ширин забороненої зони, характерних для відповідних КТ: 1 – InSb, Ge і SiC; 2 – CdTe і CdSe.

знімання оброблюваного матеріалу під час полірування напівпровідникових матеріалів узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування: 0,6 мг/хв (7,7 мкм/год або $17,3 \cdot 10^{-13}$ м³/с) для InSb; 0,04 мг/хв (0,7 мкм/год або $2,1 \cdot 10^{-13}$ м³/с) для SiC; 0,3 мг/хв (1,6 мкм/год або $9,1 \cdot 10^{-13}$ м³/с) для Ge. Незначне відхилення розрахункових і експериментальних даних, яке складало 4–5 %, свідчить, що під час полірування напівпровідникових матеріалів в мікрорезонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку, генеруються наночастинки шламу і наночастинки зносу полірувального порошку внаслідок ферстерівського резонансного перенесення енергії, опосередкованого квантовими точками (QD-FRET).

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження механізму знімання оброблюваного матеріалу і зношування частинок полірувального порошку під час полірування напівпровідникових матеріалів за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків встановлено, що утворення наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку є наслідком QD-FRET – ферстерівського резонансного перенесення енергії, опосередкованого квантовими точками, які утворюються на поверхнях оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку. Енергія, яка переноситься між частинками полірувального порошку і оброблюваною поверхнею, а також енергія наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку параболічно залежать від їхніх найбільш ймовірних розмірів, які є взаємопов'язаними з ефективною шириною забороненої зони КТ.

Показано, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу й інтенсивність зношування полірувального порошку експоненціально спадають за збільшення ефективної ширини забороненої зони КТ на відповідних поверхнях, а їхнє відношення, яке характеризує ефективність застосування дисперсної системи з мікро- і нанопорошків для полірування напівпровідникових матеріалів, лінійно зростає за зменшення відношення ефективних ширин забороненої зони, характерних для КТ на оброблюваній поверхні і на поверхні частинок полірувального порошку. Встановлено, що результати теоретичного розрахунку швидкості знімання оброблюваного матеріалу добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування кристалів InSb, SiC і Ge за відхилення 4–5 %.

ФІНАНСУВАННЯ

Дана робота не фінансувалася із зовнішніх джерел.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють, що вони не мають конфлікту інтересів.

Yu. D. Filatov¹, A. Y. Boyarintsev², O. V. Kolesnikov²,
S. M. Galkin², V. O. Novgorodtsev², Ya. I. Polupan²,
O. I. Pylypenko², 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”, Kyiv, Ukraine
Polishing of optotechnics parts from semiconductor materials

As a result of the study of the mechanism of removal of the processed material and wear of the particles of the dispersed phase of the dispersed system during the polishing of semiconductor materials, it was established that the formation of sludge nanoparticles and worn nanoparticles of the polishing powder is a consequence of QD-FRET - Förster resonance energy transfer, mediated by quantum dots, which are formed on the surfaces of the processed material and polishing powder particles. It is shown that the energy transferred between polishing powder particles and the treated surface, as well as the energy of sludge nanoparticles and wear nanoparticles of polishing powder parabolically depend on their most probable sizes, which are interrelated with the effective band gap width of the QD. It was established that the material removal rate and the intensity of wear of the polishing powder decrease exponentially with an increase in the effective band gap width of QDs on the corresponding surfaces, and their ratio, which characterizes the effectiveness of the use of a dispersed system of micro- and nanopowders for polishing semiconductor materials, increases linearly with a decrease in the ratio of the effective band gaps characteristic of QDs on the treated surface and on the surface of the polishing powder particles. It is shown that the results of the theoretical calculation of the material removal rate are in good agreement with the data of the experimental determination of the polishing performance of InSb, SiC and Ge crystals with a deviation of 4–5 %.

Keywords: *polishing, semiconductors, Förster resonance energy transfer, mediated QD (QD-FRET), material removal rate, wear intensity of polishing powder.*

1. Поперенко Л.В., Сташук В.С. Основы фізики матеріалів оптотехніки: Навчальний посібник. Київ: ВПЦ "Київський університет". 2011. 686 с.
2. Стріха М.В. Фізика конденсованого середовища: Навч. посіб. Київ: ВПЦ "Київський університет". 2022. 333 с.
3. Фреїк Д.М., Чобанюк В.М., Готра З.Ю., Дзундза Б.С., Матеїк Г.Д., Ткачук А.І. Фізика процесів у напівпровідниках та елементах електроніки: Навч. посіб. Івано-Франківськ: Вид-во Прикарпат. Нац. ун-ту ім. Василя Стефаника. 2010. 263 с.
4. 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.
5. Filatov Yu.D. Polishing of aluminosilicate materials with tools with bound polishing powder. *Sverkhchverdye Materialy*. 2001. no. 3. P. 36–49.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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. 053518–4.
10. Pandya S.G., Kordesch M.E. Characterization of InSb nanoparticles synthesized using inert gas condensation. *Nanoscale Res. Lett.* 2015. Vol. 10, art. 258.
11. 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.
12. Chen X., Zhou W., Feng Q., Zheng J., Liu X., Tang B., Li J., Xue J., Peng S. Irradiation effects in 6H-SiC induced by neutron and heavy ions: Raman spectroscopy and high-resolution XRD analysis. *J. Nucl. Mater.* 2016. Vol. 478. P. 215–221.
13. Венгер І.В., Венгер Є.Ф., Мельничук Л.Ю., Мельничук О.В. Анізотропія поверхневих плазмон-фононних поляритонів у монокристалах ZnO і 6H-SiC. Київ: Наук. думка, 2020. 191 с.
14. 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.
15. 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.
 16. Dzhagan V., Lokteva I., Himeinschi C., Jin X., Kolny-Olesiak J., Zahn, D.R.T. Phonon Raman spectra of colloidal CdTe nanocrystals: effect of size, non-stoichiometry and ligand exchange. *Nanoscale Res. Lett.* 2011. Vol. 6, no. 79.
 17. Hung L.X., Bassene P.D., Thang P.N., Loan N.T., de Marcillac W.D., Dhawan A.R., Feng F., Esparza-Villa J.U., Hien N.T.T., Liem N.Q., Coolenc L., Nga P.T. Near-infrared emitting CdTeSe alloyed quantum dots: Raman scattering, photoluminescence and single-emitter optical properties. *RSC Adv.* 2017. Vol. 7. P. 47966–47974.
 18. Bhand G.R., Chaure N.B. Synthesis of CdTe, CdSe and CdTe/CdSe core/shell QDs from wet chemical colloidal method. *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2017. Vol. 68. P. 279–287.
 19. Nien Y.-T., Zaman B., Ouyang J., Chen I.-G., Hwang C.-S., Yu K. Raman scattering for the size of CdSe and CdS nanocrystals and comparison with other techniques. *Mater. Lett.* 2008. Vol. 62, no. 30. P. 4522–4524.
 20. Dzhagan V.M., Valakh M.Ya., Raevskaya A.E., Stroyuk A.L., Kuchmiy S.Ya., Zahn D.R.T. Resonant Raman scattering study of CdSe nanocrystals passivated with CdS and ZnS. *Nanotechnology.* 2007. Vol. 18, no. 285701. P. 1–7.
 21. Jafari M.R., Alirahmi Z.S., Ghanbari D. Synthesis of CdSe and CdTe quantum dots: their effects on the Znq₂ luminescence complex for organic light emitting diodes. *J. Nanostruct. Winter.* 2021. Vol. 11, no. 1. P. 153–164.
 22. 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.
 23. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
 24. 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.
 25. 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.
 26. 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.
 27. 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.
 28. 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.
 29. Gordon F., Elcoroaristizabal S., Ryder A.G. Modelling Förster resonance energy transfer (FRET) using anisotropy resolved multi-dimensional emission spectroscopy (ARMES). *Biochim. Biophys. Acta (BBA)-Gen. Subj.* 2021. Vol. 1865, no. 2. P. 129770.
 30. 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.
 31. 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.
 32. 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.
 33. 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.
 34. Filatov Y.D., Sidorko V.I. Statistical approach to wear of nonmetallic workpiece surfaces in polishing. *Sverkhverdye Materialy.* 2005. no. 1. 58–66.
 35. Sutherland G.B.B.M. Some comments on the infrared spectra of diamond, silicon, and germanium. *J. Opt. Soc. America.* 1960. Vol. 50, no. 12. P. 1201–1203.
 36. 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.
 37. 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.

38. 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.
39. Корбутяк Д.В., Коваленко О.В., Будзуляк С.І., Калитчук С.М., Купчак І.М. Світловипромінюючі властивості квантових точок напівпровідникових сполук A2B6. *Укр. фіз. журн.* Огляди 2012. Т. 7, № 1. С. 48–95.
40. Skryshevsky V., Serdiuk T., Zakharko Y., Alekseev S., Geloan A., Lysenko V. Preparation, luminescent properties and bioimaging application of quantum dots based on Si and SiC. *Springer. Functional Nanomaterials and Devices for Electronics, Sensors and Energy Harvesting. HAL Open Sci.* 2014, art. hal-01490305.
41. Lee T.G., Enomoto K., Ohshiro K., Inoue D., Kikitsu T., Hyeon-Deuk K., Yong-Jin Pu Y.-J., Kim D.G. Controlling the dimension of the quantum resonance in CdTe quantum dot superlattices fabricated via layer-by-layer assembly. *Nat. Commun.* 2020. Vol. 11, art. 5471.
42. Li J., Zhang Y., Gao T., Hu C., Yao T., Yuan Q., Wang X., Xu P., Zhang Z., Jian J., Zhang X., Song B. Quantum dots-induced improved performance of cadmium telluride (CdTe) solar cells without Cu buffer layer. *J. Mater. Chem. A* 2017. No. 10. P. 4904–4911.
43. 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.
44. Купчак І.М., Корбутяк Д.В. Спектральні характеристики пасивованих квантових точок CdTe з координатно-залежними параметрами. *Укр. фіз. журн.* 2023. Т. 68, № 1. С. 38–46.
45. Rogach A.L., Klar T.A., Lupton J.M., Meijerink A., Feldmann J. Energy transfer with semiconductor nanocrystals. *J. Mater. Chem.* 2009. Vol. 19. P. 1208–1221.
46. Корбутяк Д.В., Коваленко О.В., Будзуляк С. І., Мельничук О.В. Наноструктури напівпровідникових сполук A2B6: монографія. Ніжин: Вид-во НДУ ім. М. Гоголя, 2020. 183 с.
47. Chern M., Toufanian R., Dennis A. Quantum dot to quantum dot forster resonance energy transfer: engineering materials for visual color change sensing. *The Analyst*. 2020. Vol. 145. P. 5754–5767.
48. 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.
49. Gharibshahi E. Simulation, synthesis and optical properties of cadmium telluride (CdTe) semiconductor nanoparticles. *Solid State Commun.* 2020. Vol. 320, art. 114009.
50. Поперенко Л.В., Кравець В.Г. Наноматеріали: оптичні, магнітооптичні, магніторезистивні та електронні властивості: Монографія. Київ: Вид-поліграф. центр “Київський університет”, 2011. 219 с.
51. 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.
52. Filatov Yu.D. Material removal rate in polishing polymethymethacrylate parts. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 3. P. 212–220.
53. Filatov Yu.D. Quantum mechanism of optical glass polishing. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 4. P. 303–313.
54. 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.
55. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Yu., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Y. Scattering of sludge nanoparticles during the polishing of optical materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 5. P. 370–378.
56. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Yu., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Y. Scattering of polishing powder wear nanoparticles on sludge nanoparticles during the polishing of polymer optical materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 6. P. 451–459.
57. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Yu., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Y. Deposition and localization of polishing powder wear nanoparticles on the processed surface of polymeric optical materials. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 1. P. 55–64.

Надійшла до редакції 03.09.24

Після доопрацювання 06.09.24

Прийнята до опублікування 07.09.24