

Дослідження процесів обробки

УДК 621.923.7

**Ю. Д. Філатов^{1, *}, А. Ю. Бояринцев², В. І. Сідорко³,
С. В. Ковальов¹, О. В. Колесніков², В. О. Новгородцев²,
Я. І. Полупан²**

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

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

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

*filatov2045@gmail.com

Механізм полірування скінтіляторів на базі полістиролу

В результаті дослідження механізму полірування скінтіляторів з полістиролу за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків встановлено, що утворення наночастинок шламу (ЧШ) і наночастинок зносу полірувального порошку (ЧП) є наслідком ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET), яке відбувається в 4-модовому режимі у відкритому мікро-резонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку. Показано, що зношування частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи відбувається вдвічі швидше, ніж знімання оброблюваного матеріалу. Показано, що під час розсіювання квантових наночастинок у відкритому резонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і притира, повний переріз розсіювання ЧШ на ЧП (31,1 Мб) набагато більше повного перерізу розсіювання ЧП на ЧШ (2,4 Мб), що зумовлює відсутність нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку на оброблюваній поверхні і наявність нальоту з наночастинок шламу на поверхні притира. Встановлено, що результати розрахунку швидкості знімання матеріалу узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування полістиролу за відхилення до 4 %, а фрагменти нальоту з наночастинок шламу на поверхні притира мають розміри від 0,2 до 1,0 мм і дискретно розташовуються в кільцевій зоні радіуса 24,5 мм. Показано, що полірування скінтіляційних елементів на базі полістиролу з використанням дисперсної системи з мікро- і наночастинок підвищує здатність детекторів щодо роздільної реєстрації швидких нейтронів та гамма-квантів за формою імпульсу для довгомірних детекторів на 14 %.

© Ю. Д. ФІЛАТОВ, А. Ю. БОЯРИНЦЕВ, В. І. СІДОРКО, С. В. КОВАЛЬОВ, О. В. КОЛЕСНИКОВ, В. О. НОВГОРОДЦЕВ,
Я. І. ПОЛУПАН, 2024

Ключові слова: полірування, полістирол, ферстерівське резонансне перенесення енергії (FRET), швидкість знімання матеріалу, фрагменти нальоту.

ВСТУП

Полірування сцинтиляторів на базі полістиролу, які широко використовують в якості детекторів іонізуючого випромінювання [1–4], здійснюють за класичним методом формоутворення оптичних поверхонь (метод притирання), що застосовується під час фінішної обробки деталей з неметалевих матеріалів для оптоелектронної, сцинтиляційної і лазерної техніки на шліфувальних і полірувальних верстатах різних типів та моделей [5–7]. Проблема забезпечення жорстких вимог до точності геометричної форми і шорсткості полірованих поверхонь оптичних елементів, які мають нанорозмірні параметри, вирішується за рахунок використання полірувальних дисперсних систем з мікро- і нанопорошків [8–12]. Швидкість знімання оброблюваного матеріалу і параметри шорсткості обробленої поверхні, інтенсивність зношування полірувального порошку і ймовірність утворення нальоту з частинок шламу на робочій поверхні притира, які залежать від фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу, притира і полірувальної дисперсної системи, режимних і кінематичних параметрів процесу обробки, визначають ефективність процесу полірування [5, 7, 13–16]. Однак, до теперішнього часу механізм утворення і переміщення наночастинок шламу і зносу полірувального порошку в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира остаточно не з'ясовано, а можливість передбачення, чи буде процес полірування ефективним з точки зору прийнятних швидкості знімання оброблюваного матеріалу і параметрів шорсткості полірованої поверхні, чи перетвориться в процес нанесення покриття з частинок зносу полірувального порошку на поверхню, що полірується, практично відсутня [17–19]. Саме тому дослідження механізму утворення і розсіювання наночастинок шламу і зносу полірувального порошку під час полірування сцинтиляторів на базі полістиролу за допомогою дисперсійних систем з мікро- і нанопорошків є актуальними.

Метою роботи є дослідження механізму полірування сцинтиляторів з полістиролу за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків та вивчення закономірностей видалення оброблюваного матеріалу, зношування полірувального порошку і утворення нальоту з частинок шламу на поверхні притира, а також дослідження функціональних характеристик детекторів для розділення нейтронного та гамма випромінювання за формою імпульсу, поверхні яких були відполіровані запропонованим методом.

МЕХАНІЗМ ВИДАЛЕННЯ ОБРОБЛЮВАНОВОГО МАТЕРІАЛУ ТА ЗНОШУВАННЯ ПОЛІРУВАЛЬНОГО ПОРОШКУ

Сучасна теорія полірування неметалевих матеріалів базується на кластерній моделі видалення оброблюваного матеріалу [5, 7, 20, 21], фізико-статистичній моделі утворення та видалення частинок шламу оброблюваного матеріалу [5, 22], теорії міжмолекулярної взаємодії Дерягіна–Ландау–Фервея–Овербека (Derjaguin–Landau–Verwey–Overbeek) [6, 10, 23–26], теорії ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) [27–33], а також квантовій теорії розсіювання наночастинок [19, 34–38]. Знімання оброблюваного матеріалу, зношування частинок дисперсної фази дисперсної системи і поверхні притира є наслідком FRET між ними, що відбуваються в системі оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира за рахунок екситонних переходів між рівнями енергії донорно-акцепторних пар у відкритому

мікрорезонаторі [39–45]. Резонансне перенесення енергії від дисперсної системи до оброблюваного матеріалу приводить до утворення наночастинок шламу оброблюваного матеріалу, яке відбувається за умови $v_2 > v_1$ (v_2, v_1 – частоти коливань молекулярних фрагментів кластерів на поверхні частинок полірувального порошку та на оброблюваній поверхні) і суттєво залежить від спектрального розділення $\delta v_1 = v_2 - v_1$ і добротності мікрорезонатора $Q_1 = v_1/(v_2 - v_1)$. Внаслідок перенесення енергії від оброблюваного матеріалу до частинок дисперсної фази дисперсної системи за умови $v_1 > v_2$ утворюються наночастинок зносу полірувального порошку, властивості яких залежать від спектрального розділення $\delta v_2 = v_1 - v_2$ і добротності мікрорезонатора $Q_2 = v_2/(v_1 - v_2)$. Система оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира, в якій генеруються наночастинок шламу і зносу полірувального порошку внаслідок резонансного перенесення енергії, подібна FRET лазерам [46–52].

Генерація наночастинок шламу і зносу полірувального порошку відбувається в мікрорезонаторі, який утворено поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку (рис. 1), а потужність генерації цих наночастинок визначає швидкість знімання оброблюваного матеріалу та інтенсивність зношування полірувального порошку у відповідності до формул [7, 17, 32, 53]:

$$V_m = \eta_1 L_{t1} Q_1 \quad \text{і} \quad V_p = \eta_2 L_{t2} Q_2, \quad (1)$$

де η_1 і η_2 – коефіцієнти об’ємного зносу [5, 7, 22, 32]; $L_{t1,2} = \frac{u\tau_{1,2}}{d} L_t$ – ефективна довжина шляху, який проходять частинки полірувального порошку розміром d за час життя кластерів оброблюваної поверхні τ_1 і частинки полірувального порошку τ_2 у збудженому стані; u – швидкість відносного переміщення деталі та притира; L_t – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні.

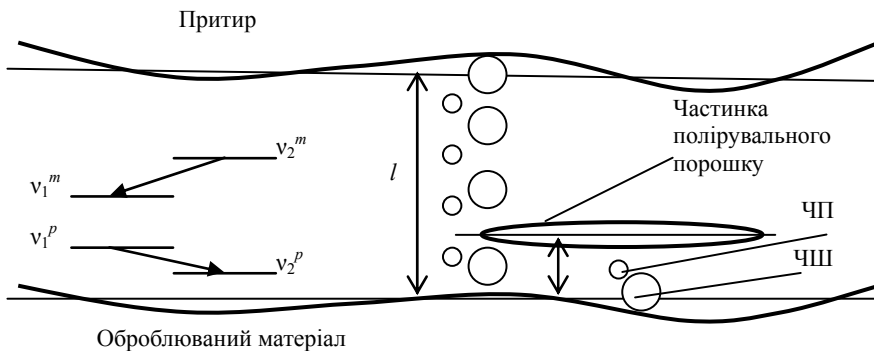


Рис. 1. Схема системи оброблювана поверхня–дисперсна система–поверхня притира.

Наночастинок шламу (ЧШ) і наночастинок зносу полірувального порошку (ЧП), що утворились в околі оброблюваної поверхні, є квантовими частинками, які рухаються вздовж вісі резонатора, утвореного двома паралельними поверхнями оброблюваного матеріалу і притира (див. рис. 1), розсіюючись тільки вперед і назад [19, 36–38]. Ймовірність утворення нальоту з ЧШ на робочій поверхні притира збільшується за підвищення їхньої концентрації N_1 і повного перерізу розсіювання на наночастинок зносу полірувального порошку σ_1 та зменшення їхнього розміру a_v і швидкості знімання оброблюваного матеріалу V_m [37]. Утворення нальоту з ЧП на оброблюваній поверхні

більш вірогідне за збільшення їхньої концентрації N_2 і повного перерізу розсіювання на наночастинках шламу σ_2 і зменшення їхнього розміру a_p та інтенсивності зношування полірувального порошку V_p [38].

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Полірування пластмасових сцинтиляторів з полістиролу діаметром 60 мм здійснювали на шліфувально-полірувальному пристрої на базі верстату мод. РМ-3 “Polerka Metalograficzna” за допомогою притира з пінополіуретану діаметром 60 мм методом жорстких осей за наступних умов: зусилля притискання притира до деталі – 10 Н, частота обертання деталі – 535 об/хв, відстань між центрами притира і деталі – 6 мм, площа контакту поверхні деталі і притира $S_c = 28,3 \text{ см}^2$, середня температура в зоні їхнього контакту $T = 298 \text{ К}$. Довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні і швидкість відносного переміщення деталі та притира складала відповідно $L_t = 94 \text{ мм}$ і $u = 1,5 \text{ м/с}$. Час контакту частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею складав 0,27 мкс.

Полірували сцинтилятори з полістиролу $(C_8H_8)_n$, які мають наступні параметри структури (рис. 2): довжина С–С зв’язку $l_{cc} = 0,14 \text{ нм}$; довжина С–Н зв’язку $l_{ch} = 1,087 \text{ нм}$; розмір С6 кільця $l_{c6} = 0,7 \text{ нм}$; густина – $1,06 \cdot \text{г/см}^3$; енергія зв’язку – 2,3 еВ; статична діелектрична проникність – 2,5; коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; питома теплоємність $c_p = 1100 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; коефіцієнт температуропровідності $\chi = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; частота власних коливань молекулярних фрагментів – 537, 694, 753, 905, 1027 см^{-1} [53–60].

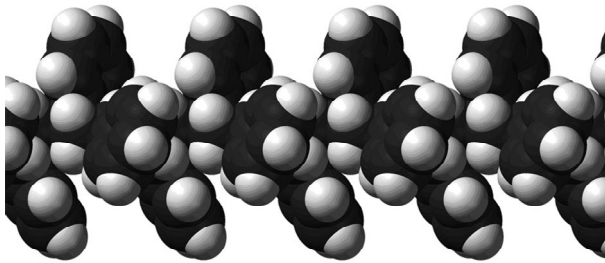


Рис. 2. Структура полістиролу.

Полірування сцинтиляторів з полістиролу здійснювали за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків, фракційний склад якої визначали за допомогою оптичного мікроскопа Axiovert 40 MAT: основна частина частинок полірувального порошку мала розміри 1–3 мкм, а розміри одиничних включень досягали 10 мкм (рис. 3, а). Реологічні властивості полірувальної дисперсної системи: густина – $1,111 \cdot \text{г/см}^3$; коефіцієнт динамічної в’язкості – $0,923 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$; коефіцієнт поверхневого натягу – $57 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$; кут змочування поверхні полістиролу – $52,1^\circ$, кут змочування поверхні притира – $38,8^\circ$ [11]. Властивості дисперсної фази полірувальної дисперсної системи: густина – $3,86 \cdot \text{г/см}^3$; енергія зв’язку – 6,5 еВ; статична діелектрична проникність – 6,1; коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 1,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; питома теплоємність $c_p = 367 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; коефіцієнт температуропровідності $\chi = 0,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; сталі кристалічної ґратки частинок полірувального порошку $a = 1,15 \text{ нм}$, $c = 0,56 \text{ нм}$ [11, 33]. Частоти власних коливань молекулярних фрагментів частинок полірувального порошку, які визначали за спектрами ІЧ поглинання (Фур’є-спектрометр Nicolet 6700), складала: 597, 733, 777, 850, 870, 943, 984, 1084 см^{-1} . Середні розміри частинок полірувального порошку визначали за

зображеннями, отриманими за допомогою растрового електронного мікроскопу Zeiss-EVO50 з системою мікроаналізу AZtec (див. рис. 3, б). Частинки полірувального порошку спостерігали у вигляді голчастих кристалів та пластинок розмірами від 5 до 10 мкм або тонких голок довжиною від 0,5 до 1 мкм, а їхня ширина змінювалась від 262 до 556 нм, так що середній розмір частинок полірувального порошку в поперечному напрямку визначали як $d = 409$ нм, а еліптичність частинок полірувального порошку оцінювали за значенням кута кривини твірної лінії, який складав $(333,4^\circ - 341,6^\circ)$ [53].

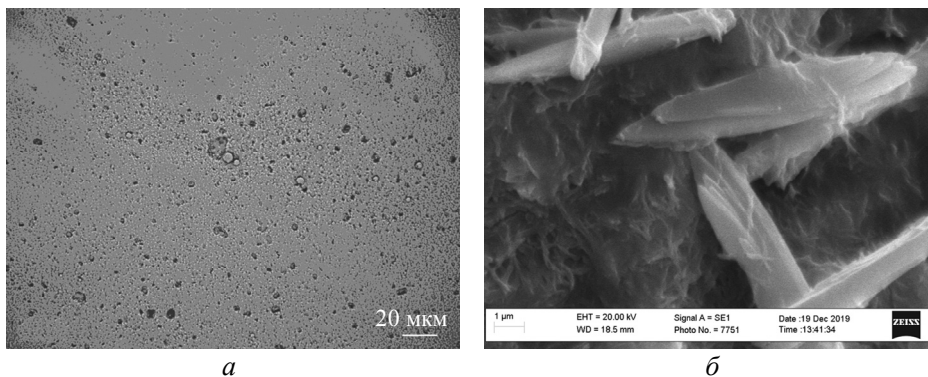


Рис. 3. Полірувальна дисперсна система.

Розміри, форму і місце локалізації нальоту з частинок шламу на робочій поверхні притира досліджували за допомогою оптичного мікроскопа ЛОМО Метап Р-1, оснащеного камерою Vision STD-Res Series. Знімання оброблюваного матеріалу визначали ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. ВЛР-200 в мг/10 хв. Підготовку плоских поверхонь зразків з полістиролу під полірування здійснювали за допомогою традиційних методів алмазної обробки [5, 61, 62].

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження механізму видалення оброблюваного матеріалу та зношування полірувального порошку під час полірування сцинтиляторів з полістиролу за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків здійснювали з врахуванням того, що наночастинки шламу утворювались в результаті FRET від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні, яке відбувається на 4 модах під час квантових переходів між енергетичними рівнями, які характеризуються частотами: $\nu_{27} = 1084 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{14} = 1027 \text{ см}^{-1}$, $\nu_{25} = 943 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{13} = 905 \text{ см}^{-1}$, $\nu_{23} = 777 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{12} = 753 \text{ см}^{-1}$ і $\nu_{22} = 733 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{11} = 694 \text{ см}^{-1}$, а наночастинки зносу полірувального порошку утворювались в результаті FRET від оброблюваної поверхні до частинок полірувального порошку під час переходів між енергетичними рівнями, які характеризуються частотами: $\nu_{14} = 1027 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{26} = 984 \text{ см}^{-1}$, $\nu_{13} = 905 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{24} = 873 \text{ см}^{-1}$, $\nu_{12} = 753 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{22} = 733 \text{ см}^{-1}$ і $\nu_{11} = 694 \text{ см}^{-1} \rightarrow \nu_{21} = 670 \text{ см}^{-1}$ [53].

Визначення розмірів наночастинок шламу і наночастинок зносу здійснювали за припущення, що вони мають форму паралелепіпеда, яка зумовлює утворення нанорозмірного рельєфу полірованих поверхонь у вигляді терасно-східчастої структури [63, 64]. Розміри паралелепіпедів, з яких складаються наночастинки шламу і наночастинки зносу полірувального порошку, а саме довжина їхніх сторін, визначаються кількістю молекулярних фрагментів $\xi_1^m =$

$k_{11}k_{12}k_{13}$ і $\xi_2^p = k_{21}k_{22}k_{23}$ ($k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{21}, k_{22}, k_{23}$ – цілі числа), з яких вони складаються.

Аналіз структури полістиролу показав, що відстань між поверхневими молекулярними фрагментами полістиролу можна оцінити як

$$L_x = \frac{\sqrt{3}}{2}l_{c6} + \frac{\sqrt{3}l_{ch}}{2} + l_{cc} = 0,84 \text{ нм}, \text{ а відстань між шарами фрагментів як } L_y =$$

$$L_z = l_{c6} + l_{ch} + l_{cc} = 0,949 \text{ нм}. \text{ Виходячи з цього, можна визначити мінімальну площу поверхні частинок шламу за формулою } S_{01} = 2[L_x L_y k_{11} k_{12} + L_x L_z k_{11} k_{13} +$$

$$L_z L_y k_{12} k_{13}], \text{ в якій } k_{12} = \left(\xi_1^m \frac{L_y^2}{L_x^2} \right)^{1/3} \text{ і } k_{11} = k_{13} = \left(\xi_1^m \frac{L_y}{L_x} \right) \frac{1}{k_{12}^2}.$$

Аналіз структури частинок полірувального порошку показав, що за міжплоскощинних відстаней $\Delta x = 1,5a$, $\Delta y = a\sqrt{3}$ і $\Delta z = c/6$ відстань між сусідніми площинами складає $L_{x2} = 1,725$ нм, $L_{y2} = 1,992$ нм, $L_{z2} = 0,093$ нм, а мінімальна площа поверхні частинок зносу визначається формулою $S_{02} =$

$$a\xi_2^p \left(\frac{3a\sqrt{3}}{k_{23}} + \frac{c}{2k_{22}} + \frac{2c}{\sqrt{3}k_{21}} \right), \text{ в якій } k_{12} = \left(\frac{\xi_2^p c}{6a} \right)^{1/3}, \quad k_{22} = \left(\frac{12\xi_2^p c}{\sqrt{3}a} \right)^{1/3} \text{ і}$$

$$k_{23} = \left(\frac{\sqrt{3}\xi_2^p}{2} \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^2 \right)^{1/3}.$$

Результати розрахунку площі поверхні, найбільш ймовірного розміру і об'єму наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Розміри наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку

Номер моди i	1	2	3	4	Номер моди j	1	2	3	4
ξ_1^m	76	136	238	74	ξ_2^p	125	179	326	188
$k_{11},$	4	5	6	4	$k_{21},$	2	2–3	3	2–3
$k_{12},$	4–5	5–6	6–7	4–5	$k_{22},$	7–8	8–9	10–11	8–9
k_{13}	4	5	6	4	k_{23}	8	8–9	10–11	9
$S_{01}, \text{ нм}^2$	80,0	123,0	175,2	80,0	$S_{02}, \text{ нм}^2$	159,2	204,7	304,2	206,5
Найбільш ймовірні значення:					Найбільш ймовірні значення:				
$S_1, \text{ нм}^2$	88,3	135,8	193,4	88,3	$S_2, \text{ нм}^2$	175,7	226,0	335,7	228,0
$a_v, \text{ нм}$	4,48	5,56	6,63	4,48	$a_p, \text{ нм}$	6,32	7,17	8,74	7,20
$V_1, \text{ нм}^3$	94,8	180,7	307,2	94,8	$V_2, \text{ нм}^3$	266,1	388,0	702,5	393,2

Теоретично розраховані значення параметрів взаємодії оброблюваної поверхні з частинками полірувального порошку під час полірування полістиролу у відповідності до методики, наведеної в [53]: спектрального розділення $\delta\nu_1$ і $\delta\nu_2$, добротності мікрорезонатора Q_1 і Q_2 , часу життя у збудженому стані кластерів оброблюваної поверхні τ_1 і частинки полірувального порошку τ_2 , концентрації частинок шламу N_1 і частинок зносу полірувального порошку N_2 , коефіцієнтів об'ємного зносу η_1 і η_2 , а також результати розрахунку шви-

дкості знімання оброблюваного матеріалу та інтенсивності зношування полірувального порошку (формули 1) наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Показники полірування сцинтиляторів на базі полістиролу

Переходи FRET	$V_{27} \rightarrow V_{14}$	$V_{25} \rightarrow V_{13}$	$V_{23} \rightarrow V_{12}$	$V_{22} \rightarrow V_{11}$	Переходи FRET	$V_{14} \rightarrow V_{26}$	$V_{13} \rightarrow V_{24}$	$V_{12} \rightarrow V_{22}$	$V_{11} \rightarrow V_{21}$
Номер моди i	1	2	3	4	Номер моди j	1	2	3	4
$\delta v_1, \text{см}^{-1}$	57	38	24	39	$\delta v_2, \text{см}^{-1}$	43	32	20	24
Q_{1i}	18,0	23,8	31,4	17,8	Q_{2j}	22,9	27,3	36,7	27,9
$\tau_{1i}, \text{нс}$	113	141	158	112	$\tau_{2j}, \text{нс}$	70	102	122	103
$N_1, 10^{14} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	1,8	1,2	0,8	1,2	$N_2, 10^{14} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	1,4	1,0	0,6	0,8
$\eta_{1i}, 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$	3,6	5,5	8,0	3,8	$\eta_{2j}, 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$	7,9	10,2	15,3	10,8
$U^*_{1i}, 10^{10} \text{ Дж/кг}$	0,9	0,6	0,4	0,9	$U^*_{2j}, 10^{10} \text{ Дж/кг}$	1,0	0,8	0,5	0,7
$V_{mi}, 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	25,3	63,9	136,2	26,0	$V_{pj}, 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$	43,3	97,8	237,0	107,1
$\sigma_{1i}, \text{Мб}$	33,8	13,7	10,1	57,3	$\sigma_{2j}, \text{Мб}$	4,0	1,9	0,6	1,7

Енергію перенесення, яка показує енергетичні витрати, необхідні для видалення з оброблюваної поверхні чи поверхні частинки полірувального порошку одиниці маси матеріалу, визначали, виходячи зі співвідношення між коефіцієнтами об'ємного зносу η_{12} , коефіцієнтами температуропровідності χ_{12} , теплоємностями оброблюваного матеріалу c_{p1} чи полірувального порошку c_{p2} [5, 7, 32, 33] у відповідності до формули $U_{12} = \frac{c_{p12}\chi_{12}}{\eta_{12}} T$ (див. табл. 2).

На рис. 4 в логарифмічному масштабі наведено залежності швидкості знімання оброблюваного матеріалу (1) та інтенсивності зношування полірувального порошку (2) від енергії перенесення, які є характерними для процесів полірування неметалевих матеріалів [5, 7].

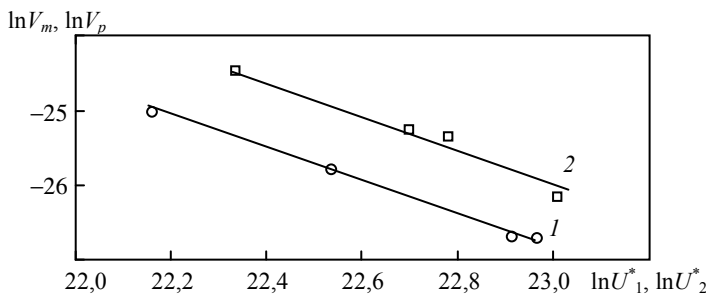


Рис. 4. Залежність швидкості знімання оброблюваного матеріалу (1) та інтенсивності зношування полірувального порошку (2) від енергії перенесення.

Швидкість знімання оброблюваного матеріалу та інтенсивність зношування полірувального порошку визначались у відповідності до формул (1), в яких

$$\text{сумарні коефіцієнти об'ємного зносу складали } \eta_1 = \sum_{i=1}^4 \eta_{1i} = 20,9 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с} \text{ і}$$

$$\eta_2 = \sum_{j=1}^4 \eta_{2j} = 44,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}, \text{ сумарний час життя збудженого стану кластерів}$$

оброблюваної поверхні і частинки полірувального порошку склали

$$\tau_1 = \sum_{i=1}^4 \tau_{1i} = 524 \text{ нс і } \tau_2 = \sum_{j=1}^4 \tau_{2j} = 397 \text{ нс, а результуючі добротності мікроре-}$$

зонатора для чотирьохмодової системи склали $Q_1 = \left[\sum_{i=1}^4 Q_{1i}^{-1} \right]^{-1} = 5,39$ і

$Q_2 = \left[\sum_{j=1}^4 Q_{2j}^{-1} \right]^{-1} = 6,97$. Розраховані значення швидкості знімання оброблю-

ваного матеріалу та інтенсивності зношування полірувального порошку під час полірування склали $V_m = 203,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ і $V_p = 421,9 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ відповідно. Це засвідчує, що під час полірування сцинтиляторів з полістиролу за даних умов зношування частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи відбувається вдвічі швидше, ніж знімання оброблюваного матеріалу.

Теоретичне значення швидкості знімання оброблюваного матеріалу добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування сцинтиляторів з полістиролу: $13,0 \pm 0,5 \text{ мг}/10 \text{ хв}$ або $26 \pm 1 \text{ мкм}/\text{год}$, або $(204,4 \pm 7,9) \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$. Незначне відхилення розрахункових і експериментальних даних, яке складало менше 4 %, свідчить, що процеси утворення і видалення наночастинок шламу з оброблюваної поверхні дійсно відбуваються за багатомодового режиму FRET.

В результаті вивчення закономірностей розсіювання наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку [37, 38] під час полірування полістиролу було розраховано значення повного перерізу розсіювання σ_{1i} і σ_{2j} , характерні для кожної моди (див. табл. 2). Значення повного

перерізу розсіювання ЧШ на ЧП $\sigma_1 = \sum_{i=1}^4 \sigma_{1i} N_{1i} / \sum_{i=1}^4 N_{1i} = 31,1 \text{ Мб}$ ($1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$) перевищує значення повного перерізу розсіювання ЧП на ЧШ

$\sigma_2 = \sum_{j=1}^4 \sigma_{2j} N_{2j} / \sum_{j=1}^4 N_{2j} = 2,4 \text{ Мб}$ в 13 разів, що свідчить про малоймовірне

утворення нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку на оброблюваній поверхні полістиролу і більш вірогідне утворення нальоту з наночастинок шламу на поверхні притира. Це підтверджено наведеним на рис. 5 зображенням ділянки полірованої поверхні сцинтилятора з полістиролу, отриманим за допомогою оптичного мікроскопа Axiovert 40 MAT, на якому наявні окремі подряпини, зумовлені присутністю в дисперсній системі крупних включень частинок полірувального порошку, і практично відсутній будь-який наліт.

В той же час на робочій поверхні притира спостерігався наліт з наночастинок шламу, фрагменти якого у вигляді плям розмірами від 0,2 до 1,0 мм (рис. 6) були дискретно розташовані в кільцевій зоні, обмеженій колами з радіусами 24 і 25 мм, що пояснюється тим, що середня швидкість переміщення відповідних фрагментів на поверхні притира відносно оброблюваної поверхні, яка становить $\sim 1,1 \text{ м}/\text{с}$, практично збігається з характеристичною швидкістю $U_0 = d/\tau_2 = 1,0 \text{ м}/\text{с}$ [5, 7]. Фрагменти нальоту складаються повністю з полістиролу, про що свідчить синій колір люмінесценції, яка збуджувалась УФ-випромінюванням.

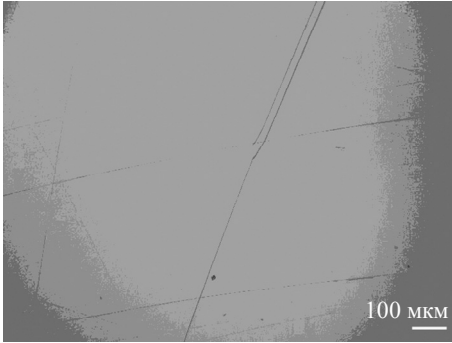


Рис. 5. Полірована поверхня сцинтилятора з полістиролу.

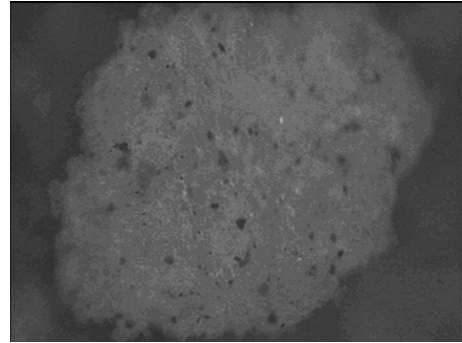


Рис. 6. Фрагмент нальоту на поверхні при-тира.

ВИМІРЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРІВ

Для визначення впливу полірування на функціональні характеристики нейтрон-гамма чутливих детекторів було виготовлено зразки розміром $15 \times 15 \times 90$ мм та $15 \times 15 \times 15$ мм з полістиролу з додаванням 30 % ТВРРО та 0,1 % РОРОР [65, 66]. Цей матеріал використовують для роздільної реєстрації швидких нейтронів. Принцип роботи таких детекторів полягає в реалізації механізму триплет-триплетної анігіляції [67]. Під час реєстрації нейтронів фотоприймачем фіксують сцинтиляційний імпульс, що складається зі швидкої (порядку десятків наносекунд) та повільної (порядку сотень наносекунд) складових. В сигналі від гамма-кванта повільна складова порівняно невелика. Частка повільної складової сцинтиляційного імпульсу може бути визначена шляхом математичної обробки оцифрованого сигналу [68]. Зазвичай ця обробка зводиться до інтегрування сигналу на двох часових інтервалах. Інтегрування на інтервалі від 0 нс (початок імпульсу) до 400 нс дає повну енергію імпульсу (Q_{total}). Інтегрування на інтервалі від 50 до 400 нс дає енергію повільної складової імпульсу (Q_{slow}). Внаслідок того, що повільна складова для нейтронів більше ніж для гамма-квантів, то і відношення Q_{slow}/Q_{total} для нейтронів буде більше. Це дозволяє розділяти за формою імпульсу нейтрони та гамма-кванти у змішаному потоці. Графічно це зображено на гістограмі розподілу кількості імпульсів з різним відношенням Q_{slow}/Q_{total} (рис. 7).

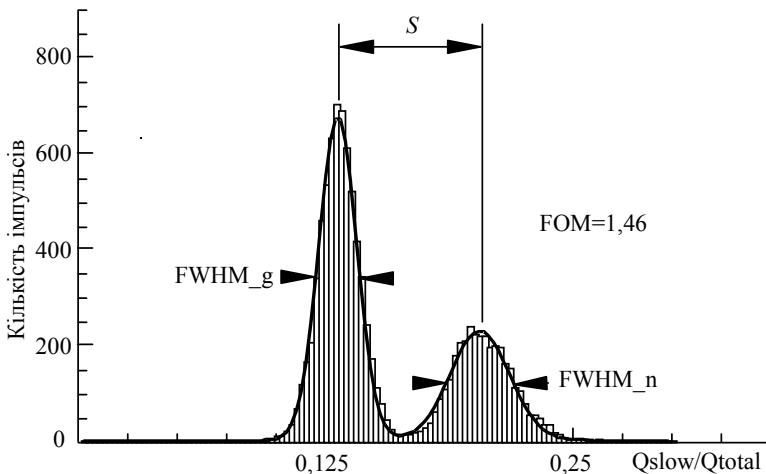


Рис. 7. Гістограма розподілу імпульсів з різним відношенням Q_{slow}/Q_{total} .

Загальноприйнятою кількісною величиною, що характеризує здатність конкретного детектора здійснювати розділення іонізуючих випромінювань різних типів, є FOM (Figure of Merit) [65–68] $FOM = S/(FWHM_g + FWHM_n)$, де S – відстань між гамма та нейтронним піками; $FWHM_g$ та $FWHM_n$ – повна ширина на половині висоти гамма та нейтронного піків відповідно (див. рис. 7).

Певні складнощі виникають у разі роздільної реєстрації імпульсів від низькоенергетичного іонізуючого випромінювання. В першу чергу це пов'язано з тим, що в цьому випадку амплітуда повільної складової сцинтиляційного імпульсу вельми мала на тлі шумів та завад. Це призводить до збільшення ширини піків, зменшення параметра FOM, а значить, і до погіршення здатності детектора розділяти нейтрони та гамма-кванти за формою імпульсу. Особливого значення це набуває для довгомірних детекторів, в яких світло від сцинтиляційного спалаху зазнає множинних відбиттів від зовнішніх поверхонь сцинтиляційного детектора. В такій ситуації якість полірування відіграє ключову роль, особливо у разі використання дзеркального відбивача.

Полірування поверхонь дослідних зразків (табл. 3, зразки 1, 3, 5, 7) здійснювали з використанням дисперсної системи з мікро- і нанопорошків як описано вище. В якості зразків порівняння (табл. 3, зразки 2, 4, 6, 8) було виготовлено такі самі сцинтиляційні елементи, полірування поверхонь яких проведено з використанням мікроабразивних порошоків на основі двооксиду церію. Кожний сцинтиляційний елемент обгорнутий відбивачем. Було досліджено два типи відбивачів: дзеркальний та дифузний. Для дзеркального відбивача застосовано два шари плівки 3M™ Enhanced Specular Reflector Film (ESR), для дифузного – два шари плівки PTFE. На одній з торцевих граней детектора було встановлено фотоприймач SiPM Hamamatsu S14160 з площею фоточутливої поверхні 6×6 мм. Оптичний контакт забезпечувався кремнійорганічним еластомером Sylgard 186. Вимірювання характеристик нейтрон-гамма розділення виконували дигітайзером CAEN DT5720. Опромінення зразків здійснювали джерелом 252 Cf.

Таблиця 3. Порівняння FOM для детекторів з різним поліруванням бічних поверхонь з використанням дисперсної системи з мікро- і нанопорошків (ДС) та мікроабразивних порошоків на основі двооксиду церію (МП)

Зразок	Розміри зразка, мм ³	Полірування	Відбивач	Параметр розділення, FOM
1	15×15×90	ДС	3M ESR	1,58
2	15×15×90	МП	3M ESR	1,38
3	15×15×90	ДС	PTFE	1,48
4	15×15×90	МП	PTFE	1,40
5	15×15×15	ДС	3M ESR	1,56
6	15×15×15	МП	3M ESR	1,48
7	15×15×15	ДС	PTFE	1,51
8	15×15×15	МП	PTFE	1,43

З аналізу даних табл. 3 видно, що детектори, полірування бічних поверхонь яких виконано з використанням дисперсної системи з мікро- і нанопорошків, демонструють більш надійне розділення нейтронного та гамма-випромінювання у порівнянні з такими саме детекторами з поліруванням за

традиційною технологією за допомогою мікроабразивних порошків на основі диоксида церію. У разі використання дзеркального відбивача на довгомірних детекторах покращення параметра розділення FOM, яке зумовлено поліруванням, складає 14 %, а для детекторів кубічної форми – 5 %. У разі використання дифузного відбивача покращення параметра розділення FOM, яке зумовлене поліруванням, не залежить від геометрії та складає 5–6 % і для довгомірних детекторів, і для детекторів кубічної форми. На думку авторів цей результат зумовлений наступними чинниками. У довгомірних детекторах з дзеркальним відбивачем та якісним поліруванням середній шлях світла від місця взаємодії іонізуючого випромінювання зі скінтілятором до фотоприймача виявляється дещо коротшим, а амплітуда скінтіляційного сигналу більшою. У випадку гіршої якості полірування або використання відбивача PTFE частина світла відбивається дифузно. Це призводить до більшої кількості відбиттів та зменшення амплітуди скінтіляційного сигналу на фотоприймачі. Відповідно підвищується похибка визначення відношення Q_{slow}/Q_{total} , нейтронні та гамма піки на гістограмі стають ширшими, що призводить до зменшення параметра розділення FOM. В детекторах кубічної форми частка відбитого світла, що потрапляє на фотоприймач після великої кількості відбиттів, є меншою. Це зумовлено суто геометричними чинниками. Внаслідок цього якість полірування менше впливає на процеси збирання світла в детекторі, та на його властивості щодо розділення іонізуючого випромінювання за формою імпульсу.

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження механізму полірування скінтіляторів з полістиролу за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків встановлено, що утворення наночастинок шламу і наночастинок зносу полірувального порошку є наслідком FRET між їхніми енергетичними рівнями в 4-модовому режимі, яке відбувається у відкритому мікрорезонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку, добротність якого залежить від спектрального розділення на відповідних частотах кожної моди.

Вивчено закономірності видалення оброблюваного матеріалу та зношування полірувального порошку і показано, що під час полірування скінтіляторів з полістиролу за даних умов зношування частинок дисперсної фази полірувальної дисперсної системи відбувається вдвічі швидше, ніж знімання оброблюваного матеріалу. Встановлено, що результати теоретичного розрахунку швидкості знімання оброблюваного матеріалу добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування скінтіляторів з полістиролу за відхилення до 4 %.

В результаті вивчення закономірностей розсіювання ЧШ і ЧП у відкритому резонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і притира, показано, що повний переріз розсіювання ЧШ на ЧП (31,1 Мб) набагато більше повного перерізу розсіювання ЧП на ЧШ (2,4 Мб). Це зумовлює відсутність нальоту з наночастинок зносу полірувального порошку на оброблюваній поверхні і наявність нальоту з наночастинок шламу на поверхні притира, фрагменти якого розмірами від 0,2 до 1 мм дискретно розташовані в кільцевій зоні [24 мм; 25 мм], що спостерігали під час експерименту.

Встановлено, що полірування скінтіляційних елементів з полістиролу з використанням дисперсної системи з мікро- і наночастинок підвищує здатність детекторів щодо роздільної реєстрації швидких нейтронів та гамма-

квантів за формою імпульсу для довгомірних детекторів. Водночас для детекторів кубічної форми якість полірування слабо впливає на функціональні характеристики зазначених детекторів.

ФІНАНСУВАННЯ

Ця робота була підтримана постійним інституційним фінансуванням. Жодних додаткових грантів для проведення або керівництва цим дослідженням отримано не було.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори цієї роботи заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Yu. D. Filatov¹, A. Y. Boyarintsev², V. I. Sidorko³, S. V. Kovalev¹,
O. V. Kolesnikov², V. O. Novgorodtsev², Ya. I. Polupan²

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”

Mechanism of polishing scintillators based on polystyrene

As a result of the study of the mechanism of polishing polystyrene scintillators using a dispersed system of micro- and nanopowders, it was established that the formation of sludge nanoparticles (SP) and polishing powder wear nanoparticles (PP) is a consequence of Förster resonance energy transfer (FRET), which occurs in 4-mode in an open microresonator formed by the surfaces of the processed material and polishing powder particles. It is shown that the wear of the particles of the dispersed phase of the polishing dispersion system occurs twice as fast as the removal of the processed material. It is shown that during the scattering of quantum nanoparticles in an open resonator formed by the surfaces of the material to be processed and the lapping, the full cross-section of the scattering of SP on the PP (31.1 Mb) is much greater than the full cross-section of the scattering of PP on the SP (2.4 Mb), which causes the absence of deposit from wear nanoparticles of polishing powder on the treated surface and the presence of sludge nanoparticle deposits on the surface of the lapping. It was established that the results of the calculation of the material removal rate are consistent with the data of the experimental determination of the productivity of polystyrene polishing with a deviation of up to 4 %, and the fragments of sludge nanoparticle deposits on the surface of the lapping have sizes from 0.2 mm to 1.0 mm and are discretely located in the annular zone radius 24.5 mm. It is shown that polishing of polystyrene based scintillators using a dispersed system of micro- and nanoparticles increases the fast neutrons and gamma quanta pulse shape discrimination for detectors with large length-to-section ratio by 14 %.

Keywords: polishing, polystyrene, Förster resonance energy transfer (FRET), material removal rate, deposit fragments.

1. Bae J.W., Kim H.R. Plastic scintillator beta ray scanner for in-situ discrimination of beta ray and gamma ray radioactivity in soil. *Nuclear Eng. Techn.* 2020. Vol. 52, no. 6. P. 1259–1265.
2. Miramonti L. A plastic scintillator detector for beta particles. *Radiat. Meas.* 2002. Vol. 35, no. 4. P. 347–354.
3. Nepokupnaya T.A., Ananenko A.A., Boyarintsev A.Yu., Bobovnikov A.A., Gektin A.V., Kovalchuk S.N., Onufriyev Yu.D., Pedash V.Yu. Large area detector of low-energy gamma radiation. *Funct. Mater.* 2017. Vol. 24, no. 4. P. 678–681.
4. Boyarintsev A.Yu., Kolesnikov A.V., Kovalchuk S.N., Nevliudov I.S. Production of large-size polystyrene based plastic scintillators with uniform optical properties. *Funct. Mater.* 2021. Vol. 28, no. 4. P. 758–763.

5. 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.
6. Suratwala T.I. *Materials Science and Technology of Optical Fabrication*. USA, Hoboken: Wiley, 2018. 416 p.
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. Peng W.Q., Guan C.L., Li S.Y., Material removal mechanism of ceria particles with different sizes in glass polishing. *Opt. Eng.* 2014. Vol. 53, no. 3, art. 035104.
9. Sreeremya T. S., Prabhakaran M., Ghosh S. Tailoring the surface properties of cerium oxide nanoabrasives through morphology control for glass CMP. *RSC Adv.* 2015. Vol. 5, no. 102. P. 84056–84065.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Filatov Yu.D. Polishing of aluminosilicate materials with tools with bound polishing powder. *Sverkhtverdye Materialy.* 2001. no. 3. P. 36–49.
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. Filatov Yu.D. Interaction between debris particles and polishing powder wear particles in polishing optoelectronic components. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, no. 4. P. 282–289.
16. Filatov Yu.D., Monteil G., Sidorko V.I., Filatov O.Y. Formation of a deposit on workpiece surface in polishing nonmetallic materials. *Smart Sensors, Actuators, and MEMS VI. Proc. SPIE.* 2013. Vol. 8763, art. 876336.
17. 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.
18. Filatov Yu.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.
19. 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.
20. Filatov Yu.D., Rogov V.V. A cluster model of mechanism of silica-containing material fatigue wear in polishing. *Sverkhtverdye Materialy.* 1994. Part 1. no. 3. P. 40–43; Part 2. no. 4. P. 45–51.
21. Filatov Y.D. Mechanism of surface microrelief formation during glass treatment. *Sverkhtverdye Materialy.* 1991. no. 5. P. 61–65.
22. Filatov Y.D., Sidorko V.I. Statistical approach to wear of nonmetallic workpiece surfaces in polishing. *Sverkhtverdye Materialy.* 2005. no. 1. 58–66.
23. Rami M.-L., Meireles M., Cabane B., Guizard Ch. Colloidal stability for concentrated zirconia aqueous suspensions. *J. Am. Ceram. Soc.* 2009. Vol. 92, iss. S1. P. S50–S56.
24. Lin G., Guo D., Xie G., Jia Q., Pan G. In situ observation of colloidal particle behavior between two planar surfaces. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2015. Vol. 482. P. 656–661.

25. Valmacco V., Elzbiaciak-Wodka M., Besnard C., Maroni P., Trefalt G., Borkovec M. Dispersion forces acting between silica particles across water: influence of nanoscale roughness. *Nanoscale Horizons*. 2016. Vol. 1. P. 325–330.
26. Sato N., Aoyama Y., Yamanaka J., Toyotama A., Okuzono T. Particle adsorption on hydrogel surfaces in aqueous media due to van der Waals attraction. *Sci. Reports*. 2017. Vol. 7, no. 6099. P. 1–10.
27. Wang Yu., Wang L.V. Förster resonance energy transfer photoacoustic microscopy. *J. Biomed. Opt.* 2012. Vol. 17, no. 8, art. 086007.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. 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)-General Subjects*. 2021. Vol. 1865, no. 2. P. 129770.
32. 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.
33. 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.
34. Eyring H., Lin S. H., Lin S.M. *Basic Chemical Kinetics*. New York, Chichester, Brisbane, Toronto: John Wiley & Sons, 1980. 493 p.
35. Юхновський І.Р. Основи квантової механіки: Навч. посібник. Либідь, 2002. 392 с.
36. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Y., Kovalev V.A., Yurchyshyn O.Y. Interaction of sludge particles and wear particles of polishing powder in the process of polishing of polymeric optical materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 3. P. 199–207.
37. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Y., 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.
38. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Boyarintsev A.Y., 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. Andrew P., Barnes W.L. Förster energy transfer in an optical microcavity. *Science*. 2000. Vol. 290, no. 5492. P. 785–788.
43. Filatov Yu.D. Material removal rate in polishing polymethylmethacrylate parts. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 3. P. 212–220.
44. Filatov Yu.D. Quantum mechanism of optical glass polishing. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 3. 4. C. 67–79.
45. Filatov Yu.D. New patterns of polishing surfaces of parts made of nonmetallic materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 2. P. 140–149.
46. Cerdán L., Enciso E., Martín V., Bañuelos J., López-Arbeloa I., Costela A., García-Moreno I. FRET-assisted laser emission in colloidal suspensions of dye-doped latex nanoparticles. *Nature Photonics*, 2012. Vol. 6, no. 9. P. 621–626.
47. Saha J., Dey D., Roy A.D., Bhattacharjee D., Hussain S.A. Multi step FRET among three laser dyes Pyrene, Acriflavine and Rhodamine B. *J. Luminescence*. 2016. Vol. 172. P. 168–174.
48. Chen Q., Kiraz A., Fan X. An optofluidic FRET laser using quantum dots as donor. *Frontiers in Biological Detection: From Nanosensors to Systems VIII. Proc. SPIE*. 2016. Vol. 9725, art. 97250I.

49. Zheng L., Zhi M., Chan Y., Khan S.A. Multi-color lasing in chemically open droplet cavities. *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8. no. 1. P. 1–8.
50. Rivera J.A., Desai K.V., Eden J.G. Fluorophore-gold nanoparticle FRET/plasmonic lasers with the streptavidin-biotin complex as the acceptor–donor linkage. *AIP Adv.* 2021. Vol. 11, art. 125033.
51. Qiao C., Zhang C., Zhou Z., Yao J., Zhao Y.S. An optically reconfigurable Förster resonance energy transfer process for broadband switchable organic single-mode microlasers. *CCS Chemistry.* 2022. Vol. 4, no. 1. P. 250–258.
52. Aas M., Chen Q., Jona's A., Kiraz A., Fan X. Optofluidic FRET lasers and their applications in novel photonic devices and biochemical sensing. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2016. Vol. 22, no. 4, art. 7000215.
53. 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.
54. Mathur V., Sharma K. Thermal response of polystyrene/poly methyl methacrylate (PS/PMMA) polymeric blends. *Heat Mass Transfer.* 2016. Vol. 52. P. 2901–2911.
55. Levytskyj V., Laruk Yu., Humenetskyj 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.
56. 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.
57. Fang J.F., Xuan Y.M., Li Q. Preparation of polystyrene spheres in different particle sizes and assembly of the PS colloidal crystals. *Sci. China Technol. Sci.* 2010. Vol. 53, no. 11. P. 3088–3093.
58. Mahasin F. Hadi Al-Kadhemy, Zahraa S. R., Sanaa R. S. Fourier transform infrared spectroscopy for irradiation coumarin doped polystyrene polymer films by alpha ray. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 2016. Vol. 9, no. 3. P. 321–331.
59. Qionglin L., Shunqin Z., You S., Zaihui F., Hongran Z., Shengpei S. A novel green process for tannic acid hydrolysis using an internally sulfonated hollow polystyrene sphere as catalyst. *RSC Adv.* 2018. Vol. 8. P. 17151–17158.
60. Herman V., Takacs H., Duclairoir F., Renault O., Tortai J.H., Viala B. Core double-shell cobalt/graphene/polystyrene magnetic nanocomposites synthesized by *in situ* sonochemical polymerization. *RSC Adv. J. Name.* 2015. Iss. 63. P. 51371–51381.
61. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 6. P. 427–433.
62. Filatov Yu.D., Vetrov A.G., Sidorko V.I., Filatov A.Yu., Kovalev S.V. Regularities of the diamond-abrasive finishing of monocrystalline silicon carbide. *J. Superhard Mater.* 2013. Vol. 35, no. 5. P. 303–308.
63. 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.
64. 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.
65. Zhmurin P.N., Eliseev D.A., Pereymak V.N., Svidlo O.V., Gurkalenko Yu.A. The plastic scintillator for n/γ-discrimination with alkyl-substituted PPO derivative. *Funct. Mater.* 2017. Vol. 24, no. 3. P. 476–480.
66. Zaitseva N., Rupert B.L., Pawelczak I. Plastic scintillators with efficient neutron/gamma pulse shape discrimination. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. Sect. A.* 2012. Vol. 668. P. 88–93.
67. Zhmurin P.N., Lebedev V.N., Adadurov A.F., Pereymak V.N., Gurkalenko Yu.A. Plastic scintillator for pulse shape neutrons and gamma quanta discrimination. *Radiat. Meas.* 2014. Vol. 62. P. 1–5.
68. Cester D., Lunardon M., Nebbia G. Pulse shape discrimination with fast digitizers. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. Sect. A.* 2014. Vol. 748. P. 33–38.

Надійшла до редакції 13.02.24

Після доопрацювання 18.02.24

Прийнята до опублікування 27.02.24