

- substrates. *Thin Solid Films*, 197(1–2), 117–128.
12. Liang, C., Cheng G., Zheng, R., et al. (2011). Fabrication and performance of TiN/TiAlN nanometer modulated coatings. *Thin Solid Films*, 520(2), 813–817.
13. Bars, J.-P., Etchessahar, E., & Debuigne, J. (1977). Étude cinétique, diffusionnelle et morphologique de la nitruration du titane par l'azote à haute température: Propriétés mécaniques et structurales des solutions solides Ti α -azote. *Journal of the Less Common Metals*, 52(1), 51–76.

УДК 621.371

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-346-354

Ю.Д. Філатов¹, А.Ю. Бояринцев², В.І. Сідорко¹, доктори технічних наук;
І.А. Рибалка², С.В. Ковальов¹, В.А. Ковальов³, О.Я. Юрчишин³, кандидати технічних наук;
О.О. Сосницька², О.І. Пилипенко², інженери

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,
вул. Автозаводська 2, 04074 м. Київ, e-mail: filatov@ism.kiev.ua

²Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України, пр. Науки 60, 61072 м. Харків,
e-mail: boyarintsev@isma.kharkov.ua

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», пр. Перемоги 37, 03056 м. Київ, e-mail: urchyshynoks@ukr.net

ПОЛІРУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ОПТОТЕХНІКИ З НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Метою даної роботи є дослідження механізму полірування деталей оптотехніки з напівпровідникових матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків та вивчення закономірностей видалення оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю полірованої поверхні. В результаті дослідження закономірностей впливу фізичних властивостей оброблюваного матеріалу та дисперсної системи на показники полірування встановлено, що утворення і видалення з оброблюваної поверхні наночастинок шламу є наслідком ферстерівського резонансного перенесення енергії, опосередкованого квантовими точками (QD-FRET), яке відбувається у відкритому мікрорезонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку. Показано, що під час полірування оптичних деталей з напівпровідникових матеріалів швидкість знімання оброблюваного матеріалу зростає за збільшення розміру наночастинок шламу і спадає за зростання ефективної ширини забороненої зони квантової точки (КТ). Параметри шорсткості полірованих поверхонь R_a , R_q і $R_{t\alpha}$ зростають за збільшення розміру наночастинок шламу і зменшуються за зростання ефективної ширини забороненої зони КТ. Встановлено, що результати теоретичного розрахунку швидкості знімання оброблюваного матеріалу під час полірування плоских поверхонь деталей оптотехніки з напівпровідникових матеріалів добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування антимоніду індію, карбїду кремнію, германію і кремнію за відхилення до 5%. Показано, що швидкість зняття оброблюваного матеріалу і шорсткість полірованих поверхонь задовольняють вимогам, що висуваються до процесу полірування оптичних поверхонь. Результати дослідження доцільно використовувати при розробці технологічних процесів полірування деталей оптотехніки з напівпровідникових матеріалів.

Ключові слова: полірування, дисперсна система, напівпровідники, наночастинки, швидкість зняття матеріалу, шорсткість.

Вступ

На теперішній час полірування деталей оптотехніки з напівпровідникових матеріалів (лінз, призм, вікон, датчиків, детекторів, фоточутливих в ІЧ діапазоні, підкладинок для світлодіодів, дзеркальних елементів, елементів тепловізорів, детекторів іонізуючого випромінювання, ІЧ-фільтрів) здійснюється за допомогою полірувальних дисперсійних систем з мікро- та нанопорошків [1–3]. Швидкість знімання оброблюваного матеріалу і параметри шорсткості обробленої поверхні залежать від реологічних властивостей дисперсної системи, структури оброблюваного матеріалу, а також діелектричних та спектроскопічних характеристик оброблюваного матеріалу та дисперсної системи [4–6].

Однак, до теперішнього часу механізм утворення наночастинок шламу під час полірування напівпровідникових матеріалів вивчено недостатньо. В зв'язку з цим дослідження механізму взаємодії частинок дисперсної фази дисперсної системи з оброблюваною поверхнею і утворення наночастинок шламу під час полірування напівпровідникових матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків є актуальними. Метою даної роботи є дослідження механізму полірування деталей оптотехніки з напівпровідникових матеріалів за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків та вивчення закономірностей видалення оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю полірованої поверхні.

Методика дослідження

Дослідження закономірностей видалення оброблюваного матеріалу здійснювалось під час полірування оптичних 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 та довжини штриха – 30 мм і 80 мм відповідно, середньої температури в зоні контакту оброблюваної деталі і притира 298 К. Оброблювались оптичні деталі з антимоніду індію (InSb, 6 елементів розмірами 18x7,5x0,6, загальна площа $8,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, густина 5,775 г/см³, статична діелектрична проникність 16,8, ширина забороненої зони 0,17 еВ, параметр кристалічної ґратки 0,648 нм), карбіду кремнію (6H-SiC, 17 елементів, загальна площа $10,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, густина 3,217 г/см³, статична діелектрична проникність 6,5, ширина забороненої зони 2,9 еВ, параметри кристалічної ґратки 0,3081 нм і 1,512 нм), германію (Ge, 2 елементи, загальна площа $20,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, густина 5,323 г/см³, статична діелектрична проникність 16, ширина забороненої зони 0,66 еВ, параметр кристалічної ґратки 0,566 нм), кремнію (Si, 3 елементи, загальна площа $19,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, густина 2,328 г/см³, статична діелектрична проникність 12, ширина забороненої зони 1,12 еВ, параметр кристалічної ґратки 0,5430 нм), телуриду кадмію (CdTe, площа $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, густина 5,855 г/см³, статична діелектрична проникність 10,6, ширина забороненої зони 1,5 еВ, параметр кристалічної ґратки 0,648 нм), селеніду кадмію (CdSe, площа $28,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, густина 5,82 г/см³, статична діелектрична проникність 8,6, ширина забороненої зони 1,74 еВ, параметр кристалічної ґратки 0,6084 нм). Полірування здійснювалось за допомогою дисперсної системи з мікро- та нанопорошків (густина 3,86 г/см³, статична діелектрична проникність 6,1, ширина забороненої зони 3,8 еВ, параметри кристалічної ґратки 1,148 нм і 0,562 нм).

Розміри частинок полірувального порошку визначались за зображеннями, отриманими за допомогою растрового електронного мікроскопу Zeiss-EVO50 з системою мікроаналізу AZtec, з яких видно, що їх середній розмір складав приблизно 400 нм, а їх форма близька до голкоподібної. Параметри шорсткості полірованих поверхонь визначались методом комп'ютерного моделювання [2, 9] та контролювались за допомогою безконтактного

інтерференційного 3D профілографа Micron-alpha. Знімання оброблюваного матеріалу визначалось ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. «ВЛР-200» в мг/хв. Підготовка плоских поверхонь оптичних деталей під полірування здійснювалась за допомогою традиційних методів тонкого та надтонкого шліфування [1–3, 6].

Механізм утворення частинок шламу під час полірування

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, яке відбувається у відкритому мікрорезонаторі, утвореному поверхнями оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку [7–9]. Утворені під час FRET від дисперсної системи до оброблюваного матеріалу наночастинки шламу характеризуються енергіями E_{2m} і E_{1m} , які визначаються за спектрами поглинання і комбінаційного розсіювання світла. Співвідношення цих енергій визначає кількість молекулярних фрагментів в кластерах оброблюваної поверхні $\xi_m = E_{1m}^4 / (E_{2m}^2 - E_{1m}^2)^2$, а також їхню енергію, яка набуває дискретних значень і залежить від енергії зв'язку E_b оброблюваного матеріалу. Ймовірність утворення наночастинок шламу описується функцією розподілу Пуассона за площами їх поверхні $P(n, v)$, а найбільш ймовірний розмір визначається як $a_v = \sum_n d(n)P(n, v)$ ($d(n)$ – розміри наночастинок шламу) і залежить від ξ_m . Швидкість знімання оброблюваного матеріалу залежить від розстроювання енергії $\delta E_m = E_{2m} - E_{1m}$ і добротності мікрорезонатора $q = E_{1m} / \delta E_m$ і визначається у відповідності до формули [10]:

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

де η – коефіцієнт об'ємного зносу [1, 2, 10], L_t – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку вздовж оброблюваної поверхні, τ – час життя кластерів оброблюваної поверхні у збудженому стані, t_c – час контакту частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею.

Результати і обговорення

Дослідження механізму видалення оброблюваного матеріалу під час полірування оптичних деталей з напівпровідникових матеріалів за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків здійснювалось з врахуванням, що в результаті FRET від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні, яке відбувається при екситон-фононних міжзонних переходах поблизу їх довгохвильового краю поглинання, енергія наночастинок шламу залежить не від енергії зв'язку E_b , а від ширини забороненої зони напівпровідника E_g і визначається для одномодового режиму FRET за умови мінімуму розстроювання енергії δE_m .

За раманівськими спектрами розсіювання світла і спектрами ІЧ-поглинання, характерними для оброблюваних напівпровідникових кристалів і для полірувальної дисперсної системи, відомими з літературно-інформаційних джерел [1–3, 10, 11], було визначено енергії E_{1m} , E_{2m} і розстроювання енергії δE_m . Визначення розмірів наночастинок шламу здійснювалось за припущення, що вони мають форму паралелепіпедів, яка зумовлює утворення нанорозмірного рельєфу полірованих поверхонь у вигляді терасно-східчастої структури [1, 2]. За довжинами сторін паралелепіпедів визначалась кількість елементарних комірок $\xi_{1m} = k_{11}k_{12}k_{13}$ (k_{11} , k_{12} , k_{13} – цілі числа), з яких складаються кластери на оброблюваній поверхні, які разом з параметрами кристалічної ґратки оброблюваного матеріалу визначали

найбільш ймовірні розміри a_v наночастинок шламу, що утворюються в результаті FRET.

Результати розрахунку параметрів взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою і найбільш ймовірного розміру наночастинок шламу наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою і розрахунку розміру наночастинок шламу

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою	Оброблюваний матеріал					
	InSb	SiC	Ge	CdTe	CdSe	Si
Енергія E_{1m} , меВ	17,38	97,81	37,24	17,32	25,00	64,55
Енергія E_{2m} , меВ	18,25	105,51	39,47	18,62	26,44	66,16
Розстроювання енергії δE_m , меВ	0,87	7,70	2,23	1,30	1,44	1,61
Кількість елементарних комірок ξ_m	95	37	65	40	71	390
Числа k_{11}	4–5	3–4	4	3	4	7–8
k_{12}	4–5	11	4	3–4	4–5	7–8
k_{13}	4–5	1	4	3–4	4	7
Найбільш ймовірний розмір наночастинок шламу a_v , нм	3,6	2,5	2,8	3,6	3,1	4,9
Борівський радіус екситону r_B , нм	7,7	3,4	8,5	6,9	3,7	6,4

Аналіз розмірів наночастинок шламу, які утворились в результаті переходів кластерів на оброблюваній поверхні із зв'язаного стану у вільний, показав, що вони характеризуються значеннями від 2,5 нм до 4,9 нм, що дозволило стверджувати, що кластери являють собою квантові точки (КТ) – ізольовані напівпровідникові нанокристали, обмежені за трьома просторовими координатами, які мають розміри 1–10 нм [11, 12], менші характерного борівського радіуса екситону в даному напівпровіднику [13].

Борівський радіус екситону розраховано за формулою $r_B = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon\hbar^2}{\mu e^2}$ (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, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд електрону, μ – ефективна маса екситону) (табл. 1). Це означає, що під час полірування напівпровідникових матеріалів замість звичайного FRET між рівнями енергії донорно-акцепторних пар на поверхнях оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку відбувається FRET, опосередковане квантовими точками (QD-FRET), які утворюються на їх поверхнях [14–15] і зумовлює необхідність врахування квантово-розмірного ефекту, який полягає в залежності ефективної ширини забороненої зони КТ від енергії першого екситонного максимуму поблизу

довгохвильового краю поглинання, яка зростає за зменшення її найбільш ймовірного розміру a_v у відповідності до формули $E_{gqd} = E_g + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2\mu a_v^2}$ [13] (табл. 2).

Таблиця 2. Показники полірування оптичних деталей з напівпровідникових матеріалів

Параметри взаємодії оброблюваної поверхні з дисперсною системою	Оброблюваний матеріал					
	InSb	SiC	Ge	CdTe	CdSe	Si
Ширина забороненої зони КТ E_{gqd} , eВ	0,42	3,05	1,15	1,86	2,06	1,28
L_t , м	0,10	0,19	0,16	0,19	0,19	0,16
t_c , мкс	1,11	0,85	1,10	0,86	0,86	1,11
Добротність мікрорезонатора q	20,0	12,7	16,7	13,3	17,4	40,0
Час життя збудженого стану КТ оброблюваної поверхні τ , нс	1114	84	354	273	288	307
Коефіцієнт об'ємного зносу η , 10^{-12} м ² /с	1,04	0,84	1,40	2,36	1,79	3,43
Швидкість знімання оброблюваного матеріалу						
Q , 10^{-13} м ³ /с	21,1	2,0	11,9	18,8	19,6	59,5
Експеримент: 10^{-13} м ³ /с	20,4	2,1	12,0	–	–	57,3
мкм/год.	9,1	0,7	2,2	–	–	10,4
Похибка розрахунку, %	3	5	1	–	–	4
Параметри шорсткості полірованої поверхні, нм						
Ra_i	8,4±0,3	4,1±0,2	6,5±0,2	6,8±0,3	7,0±0,2	10,4±0,3
Rq_i	8,8±0,3	4,3±0,2	6,8±0,2	7,4±0,3	7,3±0,2	11,0±0,5
$Rmax_i$	14,4±1,7	7,8±0,7	11,5±1,1	13,1±1,1	12,4±1,2	16,9±2,3

Враховуючи розміри квантових точок $a_v = 2,5 - 4,9$ нм (табл. 1) і ефективну ширину забороненої зони КТ, що характеризується значеннями $E_{gqd} = 0,42-3,05$ eВ (табл. 2), і припускаючи, що утворення наночастинок шламу оброблюваного матеріалу є наслідком QD-FRET, яке відбувається в одномодовому режимі, розраховано добротність мікрорезонатора q , час життя збудженого стану КТ оброблюваної поверхні τ , коефіцієнт об'ємного зносу η і швидкість знімання оброблюваного матеріалу Q у відповідності до формули (1) (табл. 2).

Показники полірування оптичних деталей з напівпровідникових матеріалів (InSb, SiC, Ge, CdTe, CdSe і Si): швидкість знімання оброблюваного матеріалу і параметри шорсткості

поверхні, розраховані теоретично і визначені експериментально, наведено в табл. 2.

В результаті їх аналізу встановлено, що за зростання розмірів наночастинок шламу швидкість знімання оброблюваного матеріалу і параметри шорсткості полірованих поверхонь деталей з напівпровідникових матеріалів збільшуються: лінійно у випадку полірування халькогенідів кадмію (CdTe, CdSe) і кремнію Si, і нелінійно – у випадку полірування кристалів InSb, Ge і SiC). За збільшення розмірів наночастинок шламу шорсткість полірованих поверхонь деталей з напівпровідникових матеріалів погіршується, так, що відхилення від лінійності залежностей Ra , Rq , $Rmax = f(a_v)$ спостерігається для карбіду кремнію (SiC), який відноситься до широкозонних напівпровідників. Показано, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу і параметри шорсткості полірованих поверхонь деталей з напівпровідникових матеріалів зменшуються за зростання ефективної ширини забороненої зони КТ.

Під час експериментальної перевірки наведених результатів показано, що теоретично розраховані значення швидкості знімання оброблюваного матеріалу під час полірування оптичних деталей з напівпровідникових матеріалів добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування: 0,7 мг/хв. (9,1 мкм/год., або $20,4 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$) – для InSb; 0,04 мг/хв. (0,7 мкм/год., або $2,1 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$) – для SiC; 0,4 мг/хв. (2,2 мкм/год., або $12,0 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$) – для Ge; 0,8 мг/хв. (10,4 мкм/год., або $57,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$) – для Si. Незначне відхилення розрахункових і експериментальних даних (менше 5 %), свідчить, що під час полірування напівпровідникових матеріалів наночастинок шламу оброблюваного матеріалу утворюються в результаті опосередкованого квантовими точками резонансного перенесення енергії (QD-FRET), завдяки чому реалізується квантово-розмірний ефект, який полягає в нелінійному збільшенні ефективної ширини забороненої зони КТ за зменшення їх розміру.

Висновки

В результаті дослідження механізму полірування оптичних деталей з напівпровідникових матеріалів за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків встановлено, що під час взаємодії оброблюваного матеріалу з частинкою дисперсної фази відбувається ферстерівське резонансне перенесення енергії, опосередковане квантовими точками (QD-FRET), які утворюються на поверхні оброблюваного матеріалу, в результаті якого з цієї поверхні видаляються наночастинок шламу.

Вивчено закономірності видалення оброблюваного матеріалу і формування нанопрофілю полірованої поверхні і показано, що під час полірування оптичних деталей з напівпровідникових матеріалів швидкість знімання оброблюваного матеріалу зростає за збільшення розміру наночастинок шламу і спадає за зростання ефективної ширини забороненої зони КТ. Параметри шорсткості полірованих поверхонь Ra , Rq і $Rmax$ зростають за збільшення розміру наночастинок шламу і зменшуються за зростання ефективної ширини забороненої зони КТ.

Встановлено, що результати теоретичного розрахунку швидкості знімання оброблюваного матеріалу добре узгоджуються з даними експериментального визначення продуктивності полірування InSb, SiC, Ge і Si за відхилення до 5%.

Y.D. Filatov¹, A.Y. Boyarintsev², V.I. Sidorko¹, I.A. Rybalka², S.V. Kovalev¹,
V.A. Kovalev³, O.Ya. Yurchyshyn³, O.O. Sosnytska², O.I. Pylypenko²

¹V.N. Bakul Institut for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine,

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

³National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky", Ukraine

POLISHING OF OPTOTECHNICS PARTS MADE FROM SEMICONDUCTOR MATERIALS

The purpose of this work is to study the mechanism of polishing of optotechnics parts made from semiconductor materials using dispersed systems of micro- and nanopowders and to study the patterns of removal of the processed material and the formation of the nanoprofile of the polished surface. As a result of investigation of the influence of the physical properties of the processed material and the dispersion system on the polishing parameters, it was established that the formation and removal of sludge nanoparticles from the processed surface is a consequence of Förster resonance energy transfer mediated by quantum dots (QD-FRET), which occurs in an open microresonator formed by the surfaces of the processed material and polishing powder particles. It is shown that during the polishing of optical parts made of semiconductor materials, the removal rate of the processed material increases with an increase in the size of the sludge nanoparticles and decreases with an increase in the effective band gap of the quantum dot (QD). The parameters of the roughness of the polished surfaces R_a , R_q , and R_{max} increase with an increase in the size of the sludge nanoparticles and decrease with an increase in the effective width of the QD band gap. It was established that the results of the theoretical calculation of the speed of removal of the processed material during polishing of flat surfaces of optotechnic parts made of semiconductor materials are in good agreement with the data of the experimental determination of the polishing performance of indium antimonide, silicon carbide, germanium and silicon with a deviation of up to 5%. It is shown that the speed of removal of the processed material and the roughness of the polished surfaces satisfy the requirements for the process of polishing optical surfaces. It is advisable to use the results of the research in the development of technological processes for polishing parts of optoelectronics made of semiconductor materials.

Key words: polishing, dispersed system, semiconductors, nanoparticles, material removal rate, roughness.

Література

1. Filatov Yu.D. Polishing of Precision Surfaces of Optoelectronic Device Elements Made of Glass, Sitall, and Optical and Semiconductor Crystals: A Review. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, N 1. – P. 30–48.
2. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Ковальов С.В. Фізичні засади формоутворення прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів. К.: Наук. думка, 2017. 248 с.
3. Filatov Yu.D. Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing / eds. J. Zhang et al. Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining. *Springer Tracts in Mechanical Engineering*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. P. 129–165.
4. 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, N 1. P. 65–73.
5. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Boyarintsev A.Y. et al. Performance Efficiency of the Polishing of Polymer Optical Materials. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, N 5. P. 358–367.
6. Filatov Y.D. New Patterns of Polishing Surfaces of Parts Made of Nonmetallic Materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, N 2. P. 140–149.
7. Dovzhenko D., Lednev M., Mochalov K. et al. Polariton-assisted manipulation of energy

- relaxation pathways: donor–acceptor role reversal in a tuneable microcavity. *Chem. Sci.* 2021. Vol. 12. P. 12794–12805.
8. Nabiev I. Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *PhysBioSymp 2019. J. Physics: Conference Series.* 2021. 2058, N 012001. P. 1–7.
 9. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Sokhan' S.V. et al. Roughness of Polished Surfaces of Optoelectronic Components Made of Polymeric Optical Materials. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, N 1. P. 54–64.
 10. Filatov Yu.D., Boyarintsev A.Yu, Sidorko et al. Polishing of polystyrene scintillators. *Functional Mater.* 2023. Vol. 30, N 3. P. 424–430.
 11. Поперенко Л.В., Стащук В.С. Основи фізики матеріалів оптотехніки: Навч. пос. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2011. 686 с.
 12. 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. пос. Івано-Франківськ: Видавництво Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2010. 263 с.
 13. 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.
 14. Корбутяк Д.В., Коваленко О.В., Будзуляк С.І., Мельничук О.В. Наноструктури напівпровідникових сполук A_2B_6 . Ніжин: Видавництво НДУ ім. М. Гоголя, 2020. 183 с.
 15. Saha J., Datta Roy A., Dey D. et al. Role of quantum dot in designing FRET based sensors. *Materials Today: Proceedings.* 2018. Vol. 5, N 1. P. 2306–2313.

Надійшла 20.08.2024

References

1. Filatov Yu.D. (2020). Polishing of Precision Surfaces of Optoelectronic Device Elements Made of Glass, Sital, and Optical and Semiconductor Crystals: A Review. *J. Superhard Mater.*, 42(1), 30–48.
2. Filatov, Yu.D., Sidorko, V.I., Filatov, O.Iu., et al., *Fizychni zasady formoutvorennia pretsyziinykh poverkhon pid chas mekhanichnoi obrobky nemetalevykh materialiv [Physical principles of forming precision surfaces during machining of non-metallic materials]*. Naukova dumka [in Ukrainian].
3. Filatov, Yu.D. (2019). Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing / eds. J. Zhang et al. *Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining. Springer Tracts in Mechanical Engineering.* (p. 129–165). Springer Nature Singapore Pte Ltd.,
4. Filatov, Yu.D., Sidorko, V.I., Kovalev, S.V., et al. (2021). Effect of the Rheological Properties of a Dispersed System on the Polishing Indicators of Optical Glass and Glass Ceramics. *J. Superhard Mater.*, 43(1), 65–73.
5. Filatov, Y.D., Sidorko, V.I., Boyarintsev, A.Y. et al. (2022). Performance Efficiency of the Polishing of Polymer Optical Materials. *J. Superhard Mater.*, 44(5), 358–367.
6. Filatov, Y.D. (2023). New Patterns of Polishing Surfaces of Parts Made of Nonmetallic Materials. *J. Superhard Mater.*, 45(2), 140–149.
7. Dovzhenko, D., Lednev, M., Mochalov, K. et al. (2021). Polariton-assisted manipulation of energy relaxation pathways: donor–acceptor role reversal in a tuneable microcavity. *Chem. Sci.*, 12, 12794–12805.

8. Nabiev, I. (2021). Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *PhysBioSymp 2019. J. Physics: Conference Series...*, 2058, (012001), 1–7.
9. Filatov, Y.D., Sidorko, V.I., Sokhan, S.V. et al. (2023). Roughness of Polished Surfaces of Optoelectronic Components Made of Polymeric Optical Materials. *J. Superhard Mater.*, 45(1), 54–64.
10. Filatov, Yu.D., Boyarintsev, A.Yu, Sidorko, V.I., et al. (2023). Polishing of polystyrene scintillators. *Functional Mater.*, 30(3), 424–430.
11. Poperenko, L.V., & Stashchuk, V.S., *Osnovy fizyky materialiv optotekhniky [Fundamentals of physics of optotechnic materials]*. VPTs Kyivskii universytet [in Ukrainian].
12. Freyk, D.M., Chobaniuk, V.M., Gotra, Z.Iu. et al., *Fizyka protsesiv u napivprovodnykakh ta elementakh elektroniky [Physics of processes in semiconductors and electronic elements]*. Vydavnytstvo Prykarpatskoho natsionalnoho universytetu imeni Vasylia Stefanyka [in Ukrainian].
13. Bardashevskaya, S.D., Budzuliak, I.M., Budzuliak, S.I. et al. (2018). Napivprovodnykovi kvantovi tochky yak materialy dlia lazeriv na ikh osnovi [Semiconductor quantum dots as materials for lasers based on them]. *Fizyka i Khimiia Tverdoho Tila – Solid state physics and chemistry*, 16, 2, 113–129.
14. Korbutiak, D.V., Kovalenko, O.V., Budzuliak, S.I. et al. (2020). *Nanostruktury napivprovodnikovoykh spoluk A₂B₆ [Nanostructures of semiconductor compounds A₂B₆]*. Vydavnytstvo NDU imeni M. Hoholia [in Ukrainian].
15. Saha J., Datta Roy A., Dey D. et al. (2018). Role of quantum dot in designing FRET based sensors. *Materials Today: Proceedings.*, 5(1), 2306–2313.

УДК 621.744

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-354-362

О.О. Матвійчук, канд. техн. наук¹; **Б.М. Савченко**, д-р техн. наук², **В.В. Ярмусевич**³

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2, 04074, м. Київ, e-mail: o.o.matviichuk@gmail.com

²Київський національний університет технологій та дизайну, Кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, вул. Немировича-Данченка, 2, кор. 1, м. Київ, Україна

³ТОВ "Ливарна майстерня «ЯРКО» м. Київ, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ СТУПЕНЯ НАПОВНЕННЯ ШЛІКЕРУ З ВОСКУ ТА ПАРАФІНУ ТВЕРДОСПЛАВНОЮ СУМІШШЮ ДЛЯ ІНЖЕКЦІЇ В ЕЛАСТИЧНІ ОБОЛОНКИ

В роботі досліджено вплив ступеня наповнення порошком твердосплавної суміші WC–8% мас. Со воскоподібного шлікеру на його мікротвердість та густину, як критерії здатності до інжекції в виготовлені на основі надрукованих 3D моделей еластичні оболонки за тиску 0,5 бар та температури 90°C. Дослідним шляхом встановлено оптимальний вміст ступеня наповнення шлікеру, необхідний для отримання міцних зразків шляхом інжекції, становить 55–57 % об. Інжекттовані зразки відпалювалися у водні та спікалися по звичайній технології твердосплавного виробництва.

Ключові слова: зв'язуюча система, парафін, бджолиний віск, порошок твердосплавної суміші, 3D-друк прототипів, еластичні оболонки, інжекція.