

## секція Конструювання та дизайн машин

УДК 621.371

### Полірування елементів оптотехніки з діелектриків, провідників і напівпровідників

Ю.Д. Філатов<sup>1</sup>, А.Ю. Бояринцев<sup>2</sup>, В.І. Сідорко<sup>1</sup>, С.В. Ковальов<sup>1</sup>, О.В. Колесніков<sup>2</sup>,  
В.О. Новгородцев<sup>2</sup>, В.А. Ковальов<sup>3</sup>, О.Я. Юрчишин<sup>3</sup>

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

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

3 – КПП ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**Анотація.** В результаті дослідження механізму знімання оброблюваного матеріалу під час полірування елементів оптотехніки з діелектриків, провідників і напівпровідників за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків встановлено, що утворення наночастинок шламу є наслідком ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) між кластерами, які утворюються на поверхнях оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку. Показано, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу визначається у відповідності до загальних закономірностей резонансної взаємодії між утвореними на вказаних поверхнях кластерами, квантовими точками і нанокристаллами, в залежності від енергії зв'язку діелектрика, ширини забороненої зони напівпровідника або оксиду металу. Встановлено, що результати теоретичного розрахунку швидкості знімання оброблюваного матеріалу добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування діелектричних матеріалів (оптичного скла марки К8 і поліметилметакрилату), напівпровідникових матеріалів (антимоніду індію (InSb) і германію (Ge)), а також міді (Cu) за відхилення 1–7 %.

**Ключові слова:** полірування, діелектрики, провідники, напівпровідники, швидкість знімання матеріалу.

Полірування елементів оптотехніки з діелектриків, провідників і напівпровідників, які широко використовуються в якості деталей оптоелектронної техніки і оптичних систем, медичної і космічної техніки, радіології та радіохімії, здійснюється традиційним методом притирання за допомогою полірувальних дисперсних систем з мікро- і нанопорошків і реалізується на шліфувально-полірувальних верстатах різних типів та моделей [1–3].

Швидкість знімання оброблюваного матеріалу, яка залежить від їх фізико-хімічних властивостей, режимних і кінематичних параметрів процесу обробки, визначає ефективність процесу полірування. Однак, до теперішнього часу механізм перенесення енергії від частинок дисперсної фази дисперсної системи до поверхні, що полірується, та утворення наночастинок шламу в системі «оброблювана поверхня – дисперсна система – поверхня притира» остаточно не з'ясовано. Саме тому дослідження закономірностей утворення наночастинок шламу під час полірування елементів оптотехніки за допомогою дисперсійних систем з мікро- і нанопорошків є актуальними.

Метою роботи було дослідження закономірностей видалення оброблюваного матеріалу під час полірування елементів оптотехніки з діелектричних, напівпровідникових і провідних матеріалів за допомогою дисперсної системи з мікро- і нанопорошків.

Експериментальні дослідження закономірностей видалення оброблюваного матеріалу здійснювались під час полірування плоских поверхонь елементів з діелектриків, напівпровідників і провідників на верстаті мод. 2ШПІ-200М за допомогою притира з пінополіуретану або замші діаметром 100 мм за зусилля притискання 10–50 Н, частоти

обертання притира 90 об/хв., зміщення 10–30 мм та довжини штриха 20–80 мм, середньої температури в зоні контакту оброблюваного елементу та притира 298 К. Оброблювали елементи з діелектричних матеріалів – оптичного скла марки К8 (діаметр 60 мм, густина  $2,52 \text{ г/см}^3$ , статична діелектрична проникність 6,5, енергія зв'язку 3,9 еВ [4]) і поліметилметакрилату (ПММА, діаметр 60 мм, густина  $1,18 \text{ г/см}^3$ , статична діелектрична проникність 3,9, енергія зв'язку 1,6 еВ [5]), напівпровідникових матеріалів – антимоніду індію (InSb, 6 елементів розмірами  $18 \times 7,5 \times 0,6$ , 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  $E_g = 0,17 \text{ еВ}$ ) і германію (Ge, загальна площа  $20,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , густина  $5,32 \text{ г/см}^3$ , статична діелектрична проникність 16, ширина забороненої зони 0,66 еВ) [6], а також міді (Cu, діаметр 42 мм, густина  $8,93 \text{ г/см}^3$ , параметр кристалічної ґратки 0,361 нм [7, 8]).

Полірування елементів оптотехніки здійснювали за допомогою дисперсних систем з мікро- та нанопорошків ДС1 (густина  $3,86 \text{ г/см}^3$ , статична діелектрична проникність 6,1, ширина забороненої зони  $E_g = 3,6 \text{ еВ}$ ) і ДС2 (густина  $6,26 \text{ г/см}^3$ , статична діелектрична проникність 21,2, ширина забороненої зони  $E_g = 3,3 \text{ еВ}$ ) [5]. Для полірування елементів із міді використовувались дисперсні системи ДС1\* і ДС2\*, в яких в якості дисперсного середовища замість води використовувався гас.

Визначення розмірів та аналіз поверхні частинок дисперсної фази полірувальних дисперсних систем здійснювали за допомогою растрового електронного мікроскопу “Zeiss-EVO50” з системою мікроаналізу AZtec [4, 5]. Розміри частинок полірувальних порошків дисперсних систем складали 409 нм для ДС1 і 910 нм для ДС2. Довжина шляху тертя  $L_t$  частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні складала 188 мм для оптичного скла К8 і ПММА, 159 мм для Ge, 101 мм для InSb і 132 мм для Cu, а час контакту  $t_c$  частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею складав: під час полірування К8, ПММА, Ge і InSb – 1,1 мкс для ДС1 і 1,9 мкс для ДС2, під час полірування міді – 4,1 мкс – для ДС1 і 7,1 мкс – для ДС2. Знімання оброблюваного матеріалу визначали ваговим методом за допомогою аналітичних терезів мод. «ВЛР-200» в мг/хв. Підготовку плоских поверхонь деталей оптотехніки під полірування здійснювали за допомогою традиційних методів тонкого шліфування та мікроточіння [1, 2].

У відповідності до сучасних уявлень про механізм взаємодії оброблюваної поверхні з частинками дисперсної фази полірувальної дисперсної системи, видалення оброблюваного матеріалу відбувається внаслідок перенесення енергії від частинок полірувального порошку до оброблюваної поверхні, яке відбувається як ферстерівське резонансне перенесення енергії (FRET) у відкритому мікрорезонаторі, що утворюється поверхнями колоїдних нанокристалів дисперсної фази і нанокристалів на оброблюваній поверхні. Ефективність FRET залежить від добротності мікрорезонатора на відповідних частотах, а швидкість зняття оброблюваного матеріалу визначається у відповідності до формули [5, 6]:

$$V = \eta L_t \frac{\tau}{t_c} q,$$

де  $\eta$  – коефіцієнт об'ємного зносу;  $L_t$  – довжина шляху тертя частинки полірувального порошку по оброблюваній поверхні;  $t_c = d/u$  – час контакту частинки полірувального порошку з оброблюваною поверхнею,  $d$  – розмір частинок полірувального порошку;  $u$  – швидкість відносного переміщення елемента та притира,  $\tau$  – час життя кластерів оброблюваної поверхні у збудженому стані;  $q$  – добротність резонатора.

Результати розрахунку швидкості зняття оброблюваного матеріалу та її експериментального визначення наведено в таблиці.

В результаті дослідження механізму знімання оброблюваного матеріалу під час полірування елементів оптотехніки з діелектриків, провідників і напівпровідників за допомогою дисперсних систем з мікро- і нанопорошків встановлено, що утворення

наночастинок шламу є наслідком ферстерівського резонансного перенесення енергії (FRET) між кластерами, які утворюються на поверхнях оброблюваного матеріалу і частинки полірувального порошку.

Таблиця

**Швидкість знімання оброблюваного матеріалу під час полірування оптичного скла  
K8, ПММА, германію, антимоніду індію і міді**

| Параметри взаємодії<br>оброблюваної поверхні<br>з полірувальною<br>дисперсною системою | Оброблюваний матеріал |       |      |      |      |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------|------|------|------|-------|
|                                                                                        | K8                    | ПММА  | Ge   | InSb | Cu   |       |
|                                                                                        | Дисперсна система     |       |      |      |      |       |
|                                                                                        | ДС2                   |       | ДС1  |      | ДС1* | ДС2*  |
| Добротність<br>мікрорезонатора $q$                                                     | 31,9                  | 105,0 | 16,7 | 20,0 | 50,5 | 146,7 |
| Час життя збудженого стану КТ<br>оброблюваної поверхні $\tau$ , нс                     | 976                   | 1279  | 354  | 835  | 725  | 818   |
| Коефіцієнт об'ємного зносу $\eta$ , $10^{-12}$ м <sup>2</sup> /с                       | 3,3                   | 5,0   | 1,39 | 1,1  | 1,3  | 1,7   |
| Швидкість знімання<br>оброблюваного матеріалу<br>$V$ , $10^{-13}$ м <sup>3</sup> /с    | 99,5                  | 650   | 11,9 | 16,7 | 19,8 | 38,8  |
| Експеримент: мкм/год                                                                   | 12,5                  | 90,0  | 2,2  | 7,5  | 5,3  | 10,6  |
| мг/хв.                                                                                 | 1,5                   | 5,0   | 0,4  | 0,6  | 1,1  | 2,2   |
| $10^{-13}$ м <sup>3</sup> /с                                                           | 98,1                  | 700   | 12,0 | 16,9 | 20,5 | 40,7  |
| Похибка розрахунку, %                                                                  | 2                     | 7     | 5    | 1    | 4    | 5     |

Показано, що швидкість знімання оброблюваного матеріалу визначається у відповідності до загальних закономірностей резонансної взаємодії між утвореними на вказаних поверхнях кластерами, квантовими точками і нанокристаллами, в залежності від енергії зв'язку діелектрика, ширини забороненої зони напівпровідника або оксиду металу. Встановлено, що результати теоретичного розрахунку швидкості знімання оброблюваного матеріалу добре узгоджується з даними експериментального визначення продуктивності полірування діелектричних матеріалів (оптичного скла марки K8 і поліметилметакрилату), напівпровідникових матеріалів (антимоніду індію (InSb) і германію (Ge)), а також міді (Cu) за відхилення 1–7 %.

### Список літератури

1. Поперенко Л. В. Основи фізики матеріалів оптотехніки: Навчальний посібник. / Л. В. Поперенко, В. С. Стащук. – К.: ВПЦ «Київський університет». 2011. – 686 с.
2. Філатов Ю. Д. Фізичні засади формоутворення прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів: Монографія. / Ю. Д. Філатов, В. І. Сідорко, О. Ю. Філатов, С. В. Ковальов. – К.: Наук. Думка. – 2017. – 248 с.
3. Filatov Yu. D. Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing, In: J. Zhang, B. Guo, J. Zhang (Eds.), Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining, Springer Tracts in Mechanical Engineering, Springer, Singapore. – 2019. – P. 129–165.
4. Філатов Ю. Д. Квантовий механізм полірування оптичного скла. Надтверді матеріали. – 2024. – № 4. – С. 67–79.
5. Філатов Ю. Д. Швидкість знімання матеріалу при поліруванні деталей з поліметилметакрилату. Надтверді матеріали. – 2024. – № 3. – С. 63–72.
6. Філатов Ю. Д. Полірування напівпровідникових матеріалів для оптотехніки: матеріали XIII міжнар. наук.-практ. конф. «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» / Ю. Д. Філатов, А. Ю. Бояринцев, В. І. Сідорко, С. В. Ковальов, В. А. Ковальов, О. Я. Юрчишин, м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р. – НУ «Чернігівська політехніка», 2024. – Т. 1, С. 84–85.

7. Moniri S., Ghoranneviss M., Hantehzadeh M. R., Asadabad M. A. Synthesis and optical characterization of copper nanoparticles prepared by laser ablation. *Bulletin of Materials Science*. – 2017. – 40 (1). – P. 37–43.
8. Tahir D., Tougaard S. Electronic and optical properties of Cu, CuO and Cu<sub>2</sub>O studied by electron spectroscopy. *J. Phys.: Condens. Matter*. – 2012. – 24 (175002). 8 p.
9. Філатов Ю. Д. Енергія перенесення під час взаємодії оптичної поверхні з полірувальною дисперсною системою / Ю. Д. Філатов, В. І. Сідорко, А. Ю. Бояринцев, С. В. Ковальов, В. А. Ковальов. *Надтверді матеріали*. – 2022. – № 2. – С. 58–69.

## **Polishing of optotechnic elements from dielectrics, conductors and semiconductors**

**Yu. Filatov, A. Boyarintsev, V. Sidorko, S. Kovalev, O. Kolesnikov, V. Novgorodtsev, V. Kovalev, O. Yurchyshyn**

**Abstract.** *As a result of the study of the mechanism of removal of the processed material during the polishing of optoelectronic elements from dielectrics, conductors and semiconductors using dispersed systems of micro- and nanopowders, it was established that the formation of sludge nanoparticles is a consequence of Förster resonance energy transfer (FRET) between clusters that are formed on the surfaces of the processed material and polishing powder particles. It is shown that the removal speed of the processed material is determined in accordance with the general laws of resonant interaction between the clusters, quantum dots and nanocrystals formed on the specified surfaces, depending on the bond energy of the dielectric, the band gap width of the semiconductor or metal oxide. It was established that the results of the theoretical calculation of the speed of removal of the processed material are in good agreement with the data of the experimental determination of the polishing performance of dielectric materials (K8 optical glass and polymethyl methacrylate), semiconductor materials (indium antimonide and germanium), as well as copper for a deviation of 1–7%.*

**Keywords:** *polishing, dielectrics, conductors, semiconductors, material removal rate.*