

Дослідження процесів обробки

УДК 621.623

Ю. Д. Філатов

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

filatov@ism.kiev.ua

Полірування прецизійних поверхонь елементів оптоелектронної техніки зі скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів. Огляд

Розглянуто роботи по створенню сучасних методів полірування прецизійних поверхонь елементів електронної техніки та оптичних систем зі скла, оптичних і напівпровідникових кристалів. Описано механізм видалення матеріалу з оброблюваної поверхні під час полірування інструментом зі зв'язаним полірувальним порошком, при механічному поліруванні суспензіями полірувальних порошків та при хіміко-механічному поліруванні. Наведено результати дослідження механізму формування нанопрофілю оптичних поверхонь під час полірування та відмічено актуальність вивчення закономірностей утворення надгладеньких поверхонь при хіміко-механічному поліруванні.

Ключові слова: полірування, швидкість видалення матеріалу, шорсткість поверхні.

ВСТУП

Сучасний розвиток науки і техніки зумовлює необхідність широкого застосування неметалевих матеріалів в машино- та приладобудуванні, літакобудуванні та космічній техніці, а також розробки новітніх технологій полірування прецизійних поверхонь деталей для оптичних систем, оптико-електронних пристроїв тощо. Проблема забезпечення жорстких вимог до точності форми, шорсткості та відбиваючої здатності поверхонь деталей з неметалевих матеріалів під час полірування дотепер не вирішена остаточно. Головною причиною цього є недостатнє вивчення процесів зняття оброблюваного матеріалу, формування нанорельєфу оброблюваної поверхні та її формування під час полірування. Незважаючи на значний прогрес в розробці та застосуванні нових високоточних методів полірування прецизійних поверхонь, у світовій практиці дотепер при виготовленні деталей та елементів оптоелектронної техніки найчастіше застосовується традиційні методи форму-

творення. Найвність в науково-технічній літературі значного обсягу інформації про закономірності процесів полірування неметалевих матеріалів, сучасні технології та методи застосування нових полірувальних матеріалів, а також відсутність узагальнюючих теоретичних розробок в цій галузі зумовлюють актуальність проведення глибокого аналізу і систематизації нових даних, опублікованих у світових наукових виданнях протягом останнього десятиріччя.

В огляді наведено дані про фізичні засади процесів формоутворення прецизійних поверхонь при поліруванні неметалевих матеріалів, описано сучасні технології полірування неметалевих матеріалів, освітлено питання, пов'язані з вивченням механізмів видалення матеріалу з оброблюваної поверхні під час полірування, моделюванням процесів полірування, дослідженням закономірностей формоутворення прецизійних оптичних поверхонь та формування мікро- та нанопрофілю поверхні, а також стану поверхонь оброблюваної деталі і робочого шару притиру. Особливу увагу в огляді приділено результатам дослідження закономірностей утворення мікро- і нанорельєфу оброблених поверхонь деталей з оптичного скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів, розробки комп'ютерних моделей мікро- і нанопрофілю поверхні при поліруванні, побудованих на основі вивчення механізму утворення частинок шламу, що видаляються з поверхні, із застосуванням методу Монте-Карло та фізичних засад формоутворення прецизійних оптичних поверхонь під час полірування.

СУЧАСНІ МЕТОДИ ПОЛІРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ЕЛЕМЕНТІВ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ЗІ СКЛА, СИТАЛІВ ТА ОПТИЧНИХ І НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛІВ

Аналізу механізму полірування оптичних поверхонь деталей електронної техніки та оптичних систем, розробці технологій полірування і дослідженню закономірностей видалення оброблюваного матеріалу, точності формоутворення оброблюваних поверхонь і формування мікро- і нанорельєфу під час полірування присвячено значну кількість монографій, дисертацій, оглядів, звітів [1–10], численних статей [11–20], що стосуються полірування оптичного скла, аморфного і кристалічного кварцу (SiO_2) [21–28], сапфіру (Al_2O_3) [29–42], карбиду кремнію (SiC) [4, 43–50], нітриду алюмінію (AlN), нітриду галію (GaN) [50–54], кремнію (Si) [55–58], германію (Ge) та інших напівпровідникових і склокерамічних матеріалів [4, 59–63], а також підкладок із моно- і полікристалів алмазу та алмазних плівок [17, 64–67].

Процес полірування оптичних поверхонь, відомий людству сотні років, практично в незмінному вигляді дійшов до сьогодення і є основою традиційних методів полірування, до яких відносяться: механічне [2, 13, 28, 40, 43, 48, 50, 53, 68–71], хімічне [61, 70, 72–74] та хіміко-механічне полірування [7, 9, 12, 26, 72, 75]. Така класифікація традиційних методів полірування – загальноприйнята, хоча є досить умовною, оскільки хіміко-механічне полірування може бути представлено як комбінація механічного і хімічного процесів, в той час як механічне полірування без врахування хімічних процесів, що відбуваються в зоні контакту поверхонь оброблюваної деталі та притиру, взагалі є не поліруванням, а процесом шліфування, при якому видалення матеріалу з оброблюваної поверхні відбувається за рахунок крихкого руйнування, утворення механічних подряпин, тріщин, відриву частинок шламу (зносу) тощо. Останнім часом розроблені та застосовуються нетрадиційні методи полірування [22, 48, 76, 77], до яких відносяться: електро-хіміко-механічне полірування та каталітичне травлення [78–82], полірування потоком рідини [78, 83–

86], полірування з допомогою ультразвукових коливань [87–94], магніто-реологічне полірування [86, 95–97], іонно-променеве полірування, трибохімічне, хіміко-динамічне полірування [98–100] тощо.

Традиційний процес полірування оптичних поверхонь зазвичай виконується на полірувальних верстатах за методом притирання при використанні абразивних (полірувальних) порошоків у зв'язаному [19, 20, 22, 87, 89, 94, 100, 104, 105], напівзв'язаному [69] або вільному стані [1, 2, 45, 47, 50, 52, 78, 106, 107]. У цих випадках, поверхня робочого шару інструмента зі зв'язаним полірувальним порошком типу АКВАПОЛ, чи частинка полірувального порошку, що перебуває у вільному чи напівзв'язаному стані, по суті, є емітером наночастинок полірувального матеріалу, які виникають внаслідок їхньої взаємодії з оброблюваною поверхнею та видалення оброблюваного матеріалу (процес перенесення) і втрати маси оброблюваної деталі [1, 108]. Аналогічні процеси відбуваються при іонній обробці оптичних поверхонь, коли при іонному бомбардуванні забезпечується видалення поверхневого шару (при додатному значенні втрати маси) або нанесення шару матеріалу (при від'ємному значенні втрати маси) під дією наночастинок.

МЕХАНІЗМ ВИДАЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ З ОБРОБЛЮВАНОЇ ПОВЕРХНІ ПІД ЧАС ПОЛІРУВАННЯ

Продуктивність полірування оптичних поверхонь елементів оптоелектронної техніки зі скла, ситалів та оптичних і напівпровідникових кристалів, зазвичай, визначається швидкістю видалення матеріалу з оброблюваної поверхні під час полірування, яка виражається в об'ємних ($\text{м}^3/\text{с}$), лінійних ($\text{мкм}/\text{год}$, $\text{нм}/\text{хв}$) або вагових ($\text{мг}/\text{год}$, $\text{мг}/\text{хв}$) одиницях. До недавнього часу значна кількість моделей процесу видалення оброблюваного матеріалу під час полірування, а також методик розрахунку інтенсивності зняття матеріалу із поверхні, що оброблюється, базувалась на відомому рівнянні Престона (Preston, 1927), що застосовували за припущень та обмежень, які були правомірними лише за окремих конкретних умов [1, 75, 110–112]. Методи моделювання та розрахунку швидкості видалення матеріалу під час полірування розроблювали стосовно процесів обробки оптичних деталей зі скла, плавленого і кристалічного кварцу, сапфіру [8, 21, 23, 24, 29, 113–117], а також елементів електронної техніки з напівпровідникових матеріалів [4, 7, 43, 59, 95, 118].

Удосконалення методик розрахунку і моделювання процесу видалення оброблюваного матеріалу під час полірування здійснювали за рахунок модифікації рівняння Престона шляхом розробки моделей контакту зерен полірувального порошку з оброблюваною поверхнею і поверхнею притиру, розгляду умов взаємодії полірувальної суспензії з оброблюваною поверхнею і поверхнею притира за наявності абразивного та інших видів зношування [7, 24, 29, 110, 119], врахування залежності коефіцієнта тертя від кінематичних параметрів процесу полірування, застосування різних методів моделювання, що засновані на використанні методів скінчених елементів, молекулярної динаміки, Монте-Карло [21, 75, 112, 118, 120–124] тощо. При поліруванні неметалевих матеріалів (скла, оптичних і напівпровідникових кристалів, кераміки, ситалів тощо) за допомогою суспензії полірувальних порошоків (на основі двооксиду церію, оксиду алюмінію, двооксиду кремнію тощо) з поверхнево-активними та іншими хімічними речовинами, коли механізм видалення матеріалу обумовлений як механічною, так і хімічною дією, швидкість видалення матеріалу нелінійно залежить від густини потужності, що вказує на відхи-

лення від рівняння Престона і можливість розглядати видалення матеріалу з оброблюваної поверхні як “непрестонівське полірування” [125–127].

Еволюція форми оброблюваної поверхні в процесі полірування визначається за швидкістю видалення матеріалу в кожній її точці й залежить від режимних та кінематичних параметрів процесу обробки, зокрема від розподілу тиску притискання деталі до притиру за коловими зонами, розподілу швидкості їхнього відносного переміщення, співвідношення діаметрів тощо [28, 117, 120, 122, 124, 128–130]. Моделювання форми поверхонь оброблюваної деталі та притиру і керування точністю формоутворення поверхонь оптичних деталей під час полірування здійснюється за допомогою функції впливу інструмента, яка визначається також на основі рівняння Престона [122–124, 131–134].

При механічній обробці поверхні твердого тіла, в тому числі поліруванні, обов’язково відбувається її зношування, а видалення матеріалу з оброблюваної поверхні є результатом утворення і відриву з неї частинок зносу (шламу), які мають кінцеві розміри й масу, а їхні функції розподілу за розмірами (за площею поверхні частинок) залежать від властивостей оброблюваного матеріалу та операції механічної обробки (шліфування, тонке або надтонке шліфування, полірування). При видаленні матеріалу з оброблюваної поверхні під час полірування потік частинок шламу через границю розділу фаз (тверде тіло–тверде тіло, або тверде тіло–рідина) розглядається як явище перенесення і з фізичної точки зору нічим не відрізняється від потоків частинок, енергії, імпульсу, електричного заряду під час дифузії, теплопровідності, в’язкості й електропровідності. В результаті дослідження контактної взаємодії робочої поверхні інструмента зі зв’язаними алмазними та іншими за хімічним складом полірувальними порошками з поверхнею оброблюваної деталі розроблено фізико-статистичну модель утворення та видалення частинок шламу оброблюваного матеріалу при фінішній алмазно-абразивній обробці функціональних матеріалів, яка полягає в тому, що в результаті силової дії інструмента на поверхню деталі утворюються частинки шламу, які рухаються в об’ємі контактної зони, а видалення оброблюваного матеріалу є масоперенесенням частинками шламу при переміщенні границі розділу інструмент–оброблювана поверхня [1, 101, 108]. Скориставшись відомими закономірностями процесів перенесення маси, імпульсу, електричного заряду та енергії через поверхню розділу інструмент–оброблювана поверхня, а також уявленнями про стан контактуючих поверхонь згідно з кластерною моделлю зносу [1, 135, 136], показано, що об’єм $V(t)$ видаленого матеріалу в залежності від часу t обробки визначається за формулою

$$V(t) = \sum_i V_i c_i(z, t) \Big|_{z=z_0},$$

де V_i , $c_i(z, t)$ – об’єм і концентрація i -х частинок шламу відповідно; z_0 – координата, що визначається законом руху границі розділу інструмент–оброблювана поверхня).

Швидкість видалення матеріалу (продуктивність полірування) визначається у відповідності до формули

$$Q = \eta L_t, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1)$$

де η – коефіцієнт об’ємного зносу; L_t – довжина шляху тертя елемента оброблюваної поверхні по поверхні полірувального інструмента.

Енергія перенесення, що показує яку енергію потрібно витрати на видалення з оброблюваної поверхні одиниці маси матеріалу, залежить від температури T в зоні контакту деталі й притиру, коефіцієнту λ теплопровідності, густини ρ і коефіцієнта об'ємного зносу оброблюваного матеріалу [1, 108]:

$$U^* = \lambda T \rho / \eta, \text{ Дж/кг.}$$

У відповідності до фізико-статистичної моделі утворення та видалення частинок шламу оброблюваного матеріалу під час полірування ймовірність їхнього утворення визначається рівнянням Фокера-Планка

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z}(Aw) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}(Bw),$$

де A, B – кінетичні коефіцієнти [1, 108].

При зміні деформованого стану поверхні оброблюваного матеріалу за умови, що її температура постійна, відбуваються переходи кластерів зі зв'язаного стану у вільний. Оброблюваний матеріал віддаляється з поверхні й перетворюється в частинки шламу, а частина механічної енергії витрачається

на утворення їхніх поверхонь: $W_d = \sigma \sum_i^n S_i$ (n – кількість частинок шламу, S_i

– площа поверхні i -ої частинки, σ – питома поверхнева енергія). У міру видалення кластерів поверхня переходу зміщується в напрямку, протилежному руху частинок шламу, а густина ймовірності їхнього утворення визначає їхню концентрацію $c_i(z, t)$, яка за умови $A = 0$ і $B = \eta$ може бути визначена у відповідності до формули

$$c_i(z, t) = n_i \left[1 - \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{\eta_i t}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha_i}{2\sqrt{\eta_i}}\right)} \right], \quad (2)$$

де n_i – концентрація частинок шламу на оброблюваній поверхні; $\operatorname{erf}(x)$ – інтеграл помилок; $\alpha_i = \frac{d_i}{\sqrt{t_c}}$ – стала, що визначається законом руху поверхні пе-

реходу; d_i – розмір i -х частинок шламу; $t_c = d_a/u$ – час контакту с поверхнею зерна полірувального порошку; d_a – середній розмір зерен; u – швидкість відносного переміщення інструмента й деталі.

Умови енергетичного балансу, пов'язані з потоками енергії через поверхню переходу,

$$-\eta p_a \frac{\partial c_i(z, t)}{\partial z} \Delta t = \sigma,$$

де p_a – номінальний тиск притискання інструмента до деталі, з врахуванням, що для довільної частинки шламу енергія перенесення визначається як

$U^* = \frac{\sigma S_i}{\rho V_i}$, та позначивши $\beta_i^2 = \frac{\alpha_i^2}{4\eta_i}$, можна виразити як систему трансценде-

нтних рівнянь

$$\frac{\exp(-\beta_i^2)}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\beta_i)} = \frac{1}{n_i S_i} \sqrt{L_i d_a S_c} \vartheta, \quad (3)$$

де S_c – площа контакту поверхонь полірувального інструмента та деталі;
 $\vartheta = \frac{\lambda T L_i}{p_a \mu S_c}$ – безрозмірний параметр.

За розв'язками β_i системи рівнянь (3) за допомогою комп'ютерних методів розрахунку визначається коефіцієнт об'ємного зносу $\eta = \sum_i \frac{d_i^2}{4\beta_i t_c}$, за яким можна визначити швидкість видалення оброблюваного матеріалу під час полірування, якщо відома концентрація частинок шламу на оброблюваній поверхні.

Для дослідження закономірностей полірування поверхонь оптичних деталей зі скла та кварцу інструментом зі зв'язаним полірувальним порошком на основі двооксиду церію була розроблена кластерна модель зняття оброблюваного матеріалу, яка у загальному вигляді сформульована в такий спосіб: оброблювана поверхня складається з набору кластерів; при силовій взаємодії поверхонь, що контактують, кластери здійснюють коливання біля положення рівноваги; знос поверхні є результатом видалення (відриву) з неї кластерів [1, 135–137]. Взаємодія поверхонь оброблюваної деталі та інструмента під час полірування, які характеризуються дуже малими значеннями параметрів шорткості й майже збігаються за формою, відбувається за рахунок міжмолекулярних сил Ван-дер-Ваальса. Взаємодія між поверхнями оброблюваної деталі й інструмента, які розділені заповненою технологічною рідиною щілиною, товщина l_0 якої задовольняє нерівності

$$0,1 \text{ нм} \ll l_0 \ll l_1, l_2,$$

де l_1, l_2 – товщини деталі й інструмента відповідно, визначається силою, що діє на одиниці площі контакту [1, 138, 139].

$$f_s(l) = -\frac{A_L}{8\pi^2 l_0^3} = -\frac{A_H}{6\pi l_0^3}, \quad (4)$$

де $A_L = \hbar \omega_{123}$ – стала Ліфшиця; $A_H = \frac{3}{4\pi} A_L$ – стала Гамакера [140–143]; $\hbar =$

$$1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} - \text{ стала Планка; } \omega_{123} = \int_0^\infty d\omega \frac{[\epsilon_1(i\omega) - \epsilon_3(i\omega)][\epsilon_2(i\omega) - \epsilon_3(i\omega)]}{[\epsilon_1(i\omega) + \epsilon_3(i\omega)][\epsilon_2(i\omega) + \epsilon_3(i\omega)]} -$$

частота, характерна для спектрів поглинання всіх трьох тіл; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ – діелектрична проникність матеріалів деталі, інструмента і технологічної рідини відповідно [140].

Енергію взаємодії поверхонь оброблюваної деталі й інструмента під час полірування визначали з урахуванням сил Ван-дер-Ваальса [139, 144–146], сталих Ліфшиця або Гамакера [140, 147–150], частотної дисперсії діелектричних сталих матеріалів деталі, інструмента і технологічної рідини [143, 151, 152], а також теорії Дерягіна–Ландау–Фервея–Овербека [3, 138, 139, 141, 150, 153]. При описі Ван-дер-Ваальсової взаємодії властивості окремих атомів, молекул та конденсованих середовищ цілком враховуються в рамках використання їхньої діелектричної проникності як функції частоти. Ці ж величини характеризують і спектри поглинання зазначених середовищ, оскільки вини-

кнення локального дипольного моменту обумовлено Ван-дер-Ваальсовими силами, і він же спричиняє активність цих середовищ в інфрачервоному поглинанні. При розгляді коливань кластерів в ангармонічному наближенні з використанням квантово-механічної теорії збурень показано, що ймовірність відриву i -х кластерів з оброблюваної поверхні описується розподілом Пуассона $P(i, \nu) = \frac{e^{-\nu} \nu^i}{i!}$ за площею їхньої поверхні [1, 2, 137], а кількість збуджених кластерів на оброблюваній поверхні визначається за формулою

$$n_0 = \frac{2Wt}{\pi\hbar},$$

де $\nu = E_b/E_c$ – параметр розподілу; E_b – енергія зв'язку оброблюваного матеріалу; $E_c = \hbar \sum_{lk} [\omega_{0l} \xi_{lk}]$ – енергія кластера; $\xi = \sum_{lk} \left[\frac{\omega_{0l}^2}{\omega_{0l}^2 - \omega_{2k}^2} \right]^2$ – кількість

молекулярних фрагментів в кластері; ω_{1l} і ω_{2k} – частота власних коливань молекулярних фрагментів оброблюваного та інструментального матеріалів в інфрачервоній області спектру; l, k – номери частот; $W = f_s l_0 S_c$ – енергія збурення; t – час полірування. Відстань l_0 між поверхнями оброблюваної деталі та інструмента (товщину проміжку між поверхнями, заповненого технологічною рідиною), визначали, виходячи з результатів аналізу гідродинаміки процесу полірування з урахуванням номінального тиску їхнього притискання, коефіцієнтів поверхневого натягу і в'язкості технологічної рідини та кутів змочування нею відповідних поверхонь. Застосування фізико-статистичної моделі утворення і видалення частинок шламу та кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування дозволяє визначити концентрації частинок шламу на оброблюваній поверхні $n_i = n_0 P(i, \nu)$, коефіцієнт η об'ємного зносу і швидкість видалення оброблюваного матеріалу [1, 2, 108].

Кластерну модель зняття оброблюваного матеріалу розроблено стосовно рівноважного процесу полірування неметалевих матеріалів інструментом зі зв'язаним полірувальним порошком, коли тиск p_g всередині технологічної рідини, яка міститься в проміжку між інструментом і деталлю на площі їхнього контакту, дорівнює номінальному тиску притискання інструмента до оброблюваної деталі p_a . При інтенсивних режимах полірування, коли число Рейнольдса для течії технологічної рідини (води) у проміжку між поверхнями інструмента та оброблюваної деталі у відповідності до формули Блазіуса $Re = uD/\mu > 10^5$ (D – діаметр інструмента; μ – кінематична в'язкість), утворюється перехідний приграничний шар і спостерігається перехід від ламінарної течії до турбулентної, а також явище гідродинамічної кавітації. За умови нерівноважного процесу полірування в рідині виникають розриви суцільності, неперервна водяна плівка в проміжку між інструментом і оброблюваною деталлю перетворюється в дискретний набір крапель. При аналізі закономірностей руху технологічної рідини в проміжку між інструментом і оброблюваною поверхнею деталі у відповідності до рівняння Навьє–Стокса показано, що концентрація частинок шламу на оброблюваній поверхні n_i і швидкість видалення оброблюваного матеріалу пропорційні l_0^{-2} та визначаються умовами контакту інструмента і деталі та реологічними властивостями рідини. Для інтенсифікації процесу полірування товщину шару рідини в проміжку між інструментом і деталлю необхідно зменшувати, що може бути забезпечено за рахунок зменшення витрат рідини. Однак за неконтрольованого зменшення кількості рідини можливе суттєве погіршення стану обробленої поверхні за

рахунок утворення на ній каскадів дефектів і нальоту з частинок зносу полірувального інструмента [1, 154].

Застосування інструмента зі зв'язаним полірувальним порошком для прецизійного полірування оптичних поверхонь забезпечує можливість керування точністю формоутворення не тільки за рахунок оптимізації режимних і кінематичних параметрів процесу, а і використання оптимальної конструкції робочого шару інструмента стосовно конкретної схеми обробки. Моделювання форми поверхонь оброблюваної деталі та інструмента здійснюється у відповідності до фізико-статистичної моделі утворення і видалення частинок шламу та кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування на основі розрахунків швидкості видалення оброблюваного матеріалу та інтенсивності зносу робочого шару інструмента в залежності від радіусу їхніх колових зон [1, 128, 129, 155].

Інструмент зі зв'язаним полірувальним порошком, зазвичай, виготовляється у вигляді високонаповненого композиційного матеріалу, що складається з полірувального порошку (двооксид церію, оксид алюмінію) та органічної зв'язки на основі деревинного пеку, епоксидних смол, поліетилентерефталату або кремнійорганічних сполук. Швидкість видалення оброблюваного матеріалу під час полірування плоских і сферичних поверхонь деталей з оптичного скла, плавленого кварцу та інших кремнеземвмісних матеріалів в залежності від типорозмірів і точності їхньої геометричної форми характеризується значеннями від 0,1 до 2,0 мкм/хв [1, 22, 94, 101].

Аналіз закономірностей механічного полірування оптичних поверхонь за допомогою суспензій (полірувальних порошоків у напівзв'язаному стані) здійснюється за наступних припущень:

- зерна полірувального порошку локалізовані на поверхні притиру або на рівні максимальної висоти нерівностей профілю (активні частинки), або в мікропорах поверхні (неактивні частинки [2, 24, 50];

- утворення частинок шламу є результатом дії сил Ліфшиця (міжмолекулярної взаємодії між оброблюваною поверхнею і поверхнею притира);

- частинки шламу утворюються за перевищення енергії кластера над енергією зв'язку оброблюваного матеріалу ($E_c \geq E_b$ [1, 135]);

- товщина проміжку між поверхнями притиру і деталі, заповненого полірувальною суспензією визначається розміром зерен полірувального порошку і не залежить від реологічних властивостей суспензії.

Кількість i -х частинок шламу на площі S_c за час контакту зерна полірувального порошку з оброблюваною поверхнею t_c з урахуванням їхнього розподілу за площами поверхні визначалась за формулою

$$n_i = \frac{A_L}{4\hbar\pi^3 l_0^2} S_c t_c P(i, \nu). \quad (5)$$

У зв'язку з тим, що елементарний акт зносу поверхні уявляли як перехід кластера із зв'язаного стану у вільний, результатом переходів між еквідистантно розташованими енергетичними рівнями є утворення частинок шламу, площі поверхні яких можуть мати тільки визначені дискретні значення, а площа поверхні i -ої частинки шламу визначається як $S_i = S_0(i + 1)$, де $i = 1, N$; N – кількість вибірок; S_0 – мінімальна площа поверхні кластера, яка залежить від структури оброблюваного матеріалу та кількості молекулярних фрагментів ξ [1, 2, 46, 47, 106]. Найбільш ймовірне значення площі поверхні частинки шламу визначається, виходячи з розподілу Пуассона, у відповідності до фор-

мули $S = \sum_i S_i P(i, v)$. Частинки шламу є паралелепіпедами, довжина сторін

яких визначається кількістю молекулярних фрагментів $\xi = k_1 k_2 k_3$ (k_1, k_2, k_3 – цілі числа), з яких він складається. Найбільш ймовірний розмір частинки шламу $a_v = \sum_i d_i P(i, v)$ визначається за аналогією з діаметром Фере для пло-

ських фігур як діаметр сфери, площа поверхні якої дорівнює площі поверхні частинки шламу, у відповідності до формули $d(i) = [S_i/\pi]^{1/2}$.

При механічному поліруванні плоских поверхонь оптико-електронних елементів із карбиду кремнію, нітриду галію, нітриду алюмінію і сапфіру за допомогою суспензії алмазних мікропорошків АСМ 2/1 на притирі з пінополіуретану встановлено, що швидкість видалення оброблюваного матеріалу лінійно спадає при збільшенні їхньої енергії зв'язку і залежить від теплофізичних характеристик оброблюваного матеріалу, конструктивних параметрів оброблюваних деталей, режимних та кінематичних параметрів процесу обробки, що виражаються через безрозмірний параметр θ , у повній відповідності до фізико-статистичної моделі утворення та видалення частинок шламу і кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування. Показано також, що швидкість видалення оброблюваного матеріалу лінійно збільшується при збільшенні сил Ліфшиця (4), що діють на площі контакту, і лінійно спадає при збільшенні енергії перенесення W , яка характеризує енергетичні витрати на видалення з оброблюваної поверхні одиниці маси матеріалу [108]. Крім того показано, що коефіцієнти температуропровідності χ і

об'ємного зносу η зв'язані між собою співвідношенням $\frac{\eta}{\chi} = \frac{c_p}{W} T$ (c_p – питома

теплоємність; T – температура в контактній зоні). Швидкість видалення оброблюваного матеріалу під час полірування кристалів карбиду кремнію, нітриду галію, нітриду алюмінію, сапфіру та кварцу характеризується значеннями 15,5, 12,4, 3,0, 3,9, 4,8 мкм/год [2, 50, 128]. При механічному поліруванні підкладок із нітриду галію за допомогою суспензій алмазних порошків зернистістю 0,05–0,50 та 1,5–9,0 мкм складає відповідно 0,5–4,0 та 5–50 мкм/год [53].

Вплив анізотропії кристалів на швидкість видалення оброблюваного матеріалу під час механічного полірування досліджували при поліруванні площин сапфіру з різною кристалографічною орієнтацією за допомогою суспензії порошку кубічного нітриду бору [2, 106]. Мінімальна площа поверхні частинок шламу площин сапфіру з різною кристалографічною орієнтацією (c (0001), a (11 $\bar{2}$ 0), m (10 $\bar{1}$ 0), r (10 $\bar{1}$ 2) [34]) та їхня поверхнева енергія визначаються за принципом Гіббса-Кюрі, згідно з яким рівноважною формою кристала є така, поверхнева енергія якої при даному об'ємі – найменша. Тобто, частинка шламу, що утворилась при поліруванні кристалу, характеризується мінімальною поверхневою енергією $\sigma = \sum_n \sigma_{0n} S_{gn}$ (σ_0 і S_g – поверхнева енер-

гія і площа n -ої грані відповідно). З урахуванням наведених в [156] значень поверхневої енергії для відповідних граней визначена поверхнева енергія частинок шламу і числа k_1, k_2, k_3 , від яких залежать їхні розміри. Встановлено, що швидкість видалення оброблюваного матеріалу під час полірування вказаних площин лінійно зменшується при зростанні енергії перенесення, значення якої за умови використання суспензії полірувальних порошків КМ 0,5/0

знаходиться в інтервалі $9,4 < \lg W < 9,6$, який відповідає класичному процесу полірування оптичних поверхонь [2, 44, 46, 106, 108], а відносна швидкість видалення оброблюваного матеріалу характеризується співвідношенням: 1,00:1,06:1,41:1,57 і збільшується в ряду $m < c < a < r$ від 0,045 до 0,075 мкм/хв. Швидкість видалення оброблюваного матеріалу при механічному поліруванні сапфіру за допомогою суспензії алмазних мікропорошків зернистістю (28/20...10/7) для площин з різною кристалографічною орієнтацією складає від 20 до 60 мкм/год [40], а при використанні суспензій з оксидів алюмінію, хрому, заліза, міді, магнію, двооксиду церію і двооксиду кремнію вона складає від 0,7 до 7,0 мкм/год, або від 0,1 до 0,5 мг/год [13, 39]. При поліруванні площини c (0001) сапфіру за допомогою суспензії алмазного порошку (АСМ 2/1), порошоків нітриду бору (КМ 0,5/0) і МАХ-фази (Ti_3AlC_2) продуктивність полірування складає відповідно 1,0, 1,4 і 1,4 мкм/год [45].

При поліруванні оптичного скла (силікатного, боросилікатного, фосфатного), плавленого та кристалічного кварцу суспензіями з двооксиду церію і двооксиду кремнію різного складу швидкість видалення оброблюваного матеріалу складає від 0,1 до 11,5 мкм/год [12, 26]. При поліруванні карбіду кремнію суспензією порошоків колоїдного кремнезему і ультрадисперсних алмазів швидкість видалення оброблюваного матеріалу дорівнює 0,2 мкм/год (0,4 мг/год) [43], а при використанні алмазних мікропорошків (АСМ 2/1), порошоків двооксиду церію (SeO_2), оксиду хрому (Cr_2O_3), оксиду алюмінію (Al_2O_3), двооксиду титану (TiO_2), карбіду бору (B_4C), нітриду бору (сBN, КМ 0,5/0) і МАХ-фази (Ti_3AlC_2) – 0,27, 0,20, 0,29, 0,61, 1,4, 2,6, 0,10 і 0,02 мкм/хв відповідно [1, 44–46].

Під час механічного полірування оптичних поверхонь за допомогою полірувальної суспензії на кожне зерно полірувального порошку за умови відсутності його хімічної взаємодії з оброблюваною деталлю діє результуюча сила молекулярного притягання, яка є сумою сили Ван-дер-Ваальса, сили електростатичної взаємодії, електричної сили подвійного шару, капілярної та гравітаційної сил. Кількісне порівняння сил, діючих на зерна полірувального порошку, розмір яких < 1 мкм, показує, що капілярні сили, які пов'язані з поверхневим натягом суспензії, проявляються у макроскопічному масштабі й визначають сили притягання між оброблюваною деталлю і притиром, є найбільшими. Серед інших найбільшими за абсолютною величиною є ван-дер-ваальсові сили, сили подвійного шару, які виникають внаслідок зарядження зерна полірувального порошку й електризації оброблюваної поверхні, приблизно на порядок менші, а силами електростатичної взаємодії й тяжіння можна знехтувати [3, 140, 144, 150].

У відповідності до кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування [1, 135–137] частинки шламу утворюються в результаті збудження нормальних коливань молекул в оброблюваному матеріалі й зернах полірувального порошку, які взаємодіють внаслідок дії ван-дер-ваальсових сил. Всередині суспензії при відносному переміщенні зерен полірувального порошку й оброблюваної поверхні на кластер періодично діють окремі полірувальні зерна, він переходить на більш високі енергетичні рівні до тих пір, поки його енергія не перевищить енергію зв'язку оброблюваного матеріалу. Енергія взаємодії сферичних частинок полірувального порошку й оброблюваної плоскої поверхні за теорією Дерягіна–Ландау–Фервея–Овербека визнається за формулою [138, 139, 145, 149, 153, 157, 158]

$$U(x) = -\frac{A_L}{8\pi} \left[\frac{d}{2x} + \frac{d}{2(x+d)} + \ln\left(\frac{x}{x+d}\right) \right], \quad (6)$$

де d – діаметр частинки полірувального порошку, x – найменша відстань між частинкою і поверхнею.

Енергія збудження кластера визначається як середнє значення потенціалу взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею з урахуванням їхнього рівномірного розташування по висоті проміжку між

притиром і оброблюваною поверхнею: $W = \frac{1}{l_0} \int_0^{l_0} U(x) dx$. Кількість i -х части-

нок шламу на площі контакту S_c з урахуванням їхнього розподілу за площами поверхні виражається за формулою

$$n_i = \frac{2W}{\pi h S_c} P(i, v). \quad (7)$$

При поліруванні плоских поверхонь елементів із нітриду алюмінію за допомогою суспензії порошоків нітриду бору (КМ 0,5/0, концентрація – 14 % (за масою)) на притирі з пінополіуретану встановлено, що полірувальні зерна займають близько 7 % об'єму контактної зони, частинки шламу – 0,3 %, частинки зносу полірувального порошку – 0,4 %, а на одне зерно полірувального порошку припадає 10^5 частинок шламу і частинок зносу. Показано, що розміри частинок шламу складають 1,6, 2,3, 2,8, 3,2 і 3,6 нм, найбільш ймовірний розмір – 2,2 нм, середнє значення потенціалу взаємодії частинок полірувального порошку з оброблюваною поверхнею – 4,9 меВ, концентрація частинок шламу, що утворюються на площі контакту оброблюваної поверхні і притиру за одиницю часу – $1,8 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, середнє значення об'єму частинок шламу – $2,4 \text{ нм}^3$, кількість молекулярних фрагментів AlN в частинці $\xi_1 = 57$, середнє значення об'єму частинок зносу полірувального порошку – $2,8 \cdot \text{нм}^3$ (середній розмір – 1,7 нм), кількість молекулярних фрагментів BN в частинці $\xi_2 = 74$, коефіцієнт об'ємного зносу – $6,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$, а швидкість видалення оброблюваного матеріалу – $1,16 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ (0,22 мг/хв або 1,5 мкм/год) [157].

При поліруванні площини c (0001) кристалів карбїду кремнію за допомогою полірувальних суспензій із алмазного мікропорошку ACM 2/1, кубічного нітриду бору (КМ 0,5/0), МАХ-фази (Ti_3AlC_2) зернистістю 0,5/0 і колоїдного кремнезему встановлено, що швидкість видалення оброблюваного матеріалу дорівнює 15,5, 5,5, 0,8 і 0,3 мкм/год відповідно [45]. При поліруванні площини a (11 $\bar{2}$ 0) сапфіру за допомогою суспензій із полірувальних порошоків МАХ-фази (Ti_3AlC_2), кубічного нітриду бору (КМ 0,5/0), алмазного мікропорошку ACM 2/1, колоїдного кремнезему і колоїдної оксидної системи показано, що швидкість видалення оброблюваного матеріалу дорівнює 1,4, 1,4, 1,0, 0,3 і 0,2 мкм/год відповідно [45].

Хіміко-механічне полірування застосовується для отримання оптичних поверхонь з надзвичайно високими вимогами за параметрами точності, шорсткості, чистоти і відбиваючої здатності, що є необхідною умовою при створенні сучасних оптичних та оптико-електронних приладів. При хіміко-механічному поліруванні видалення оброблюваного матеріалу зумовлено механічним зношуванням поверхні за наявності додаткової хімічної дії суспензії, яка характеризується хімічними параметрами: рН суспензії, ізоелектрична точка (ІЕТ) або точка нульового заряду (pzc), дзета-потенціал тощо [5,

8, 70, 126]. При поліруванні оптичних поверхонь за допомогою полірувальних суспензій чи колоїдних систем, до складу яких входять хімічні реагенти (травники) на основі лугів, кислот, окислювачів тощо, на частинки полірувального порошку діють не тільки сили Ван-дер-Ваальса, а і сили електростатичної взаємодії з оброблюваною поверхнею, поверхнею притиру, частинками шламу і зносу полірувального порошку [140, 144, 150, 153]. Хіміко-механічне полірування елементів і деталей зі скла, ситалів, плавленого та кристалічного кварцу [23, 24, 72, 153, 159], сапфіру [29–31, 34, 36, 37, 39, 40, 42, 160, 161], кремнію [11, 56, 58], карбіду кремнію [9, 14, 43, 49, 114], нітриду алюмінію і нітриду галію [15, 16, 52, 162], а також деяких металів здійснюється за допомогою полірувальних нанопорошків двооксиду кремнію, двооксиду церію, оксидів алюмінію, магнію та заліза, а також нанопорошків алмазу [6, 9, 32, 38, 43, 56, 58, 113].

Характерним для хіміко-механічного полірування оптичних поверхонь є те, що поряд з залежностями швидкості видалення оброблюваного матеріалу від розміру та концентрації наночастинок полірувального порошку в суспензії існує суттєвий вплив на неї рН суспензії [9, 38, 41, 52, 56, 57] та дзета-потенціалу частинок полірувального порошку, оброблюваного матеріалу і притиру (табл. 1) [36, 38, 56, 60, 141, 144, 150, 151, 153, 159, 161].

Аналіз даних табл. 1, в якій наведено показники процесу хіміко-механічного полірування поверхонь оптичних деталей та елементів електронної техніки зі скла, кварцу, сапфіру, карбіду кремнію, нітриду кремнію, нітриду алюмінію, нітриду галію і нітриду кремнію за допомогою суспензій чи колоїдних систем, до складу яких входять полірувальні порошки SiO_2 , Al_2O_3 , CeO_2 , Cr_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 , CuO та ін., а також травники на основі різних хімічних сполук (лугів, кислот, солей), показує, що швидкість видалення оброблюваного матеріалу змінюється у широких межах від часток одиниць до десятків мкм/год, збільшується у випадку, коли різниця дзета-потенціалів частинок полірувального порошку і оброблюваного матеріалу більша, а також нелінійно зростає з ростом сили притягання між ними, що узгоджується з теорією Дерягіна–Ландау–Фервея–Овербека [138, 139, 145, 149, 153, 164].

Таблиця 1. Показники хіміко-механічного полірування оптичних поверхонь

Оброблюваний матеріал	Полірувальний порошок	pH	Дзета-потенціал, мВ	Швидкість видалення матеріалу, мкм/год	Шорсткість поверхні R_q (rms), нм	Джерело
Скло	CeO_2	–	–	1,5 мг/год	0,272	[26]
	CeO_2	8,7	10	16,0	0,815	[159]
	CeO_2	–	–	0,6–1,7	0,26–0,58	[12]
	SiO_2	–	–	0,26–0,35	0,21–0,23	
	CeO_2	–	–76,1–16,7	5,9–10,0	$Sa = 1,25$	[163]
Zerodur	Al_2O_3	–	–	31,3–58,8	10,05–6,82	[111]
	CeO_2	–	–	–	1,5–0,7	
Кварц	SiO_2	–	–	3,4	$Ra = 0,19$	[23]
Сапфір	Al_2O_3	–	–	40,7 мг/год	$Ra = 0,36$	[160]
	Al_2O_3	12	–36	0,042	2,2	[161]
	SiO_2	–	–30	0,007	0,68	

Таблиця 1. (Продовження)

	SiO ₂	7–8	–	0,3	Ra = 0,22	[42]
		8–9		0,2	Ra = 0,3	
	SiO ₂	8,54	–	0,35	Ra = 0,2	[98]
		10,85		0,36	Ra = 0,2–0,3	
		9,3		0,15	Ra = 0,3	
	SiO ₂	–	–(42–46)	0,7–1,6	0,18–1,32	[36]
	SiO ₂	2	–5	0,2	0,13	[38]
		8	–42	1,1	0,26	
		10	–45	1,0	0,15	
	SiO ₂	10,1	–	1,2	–	[37]
		10,3		0,4		
	SiO ₂	–	–	1,0–1,2	–	[30]
	SiO ₂	–	–	2,8	4,9–9,3	[39]
	CeO ₂			2,6		
	Cr ₂ O ₃			2,6		
	MgO			2,5		
	Fe ₂ O ₃			1,7		
	CuO			0,7		
	SiO ₂	8–9	–	0,1–0,2	–	[41]
	SiO ₂	–	–	0,05–0,15	Ra = 0,2–0,3	[40]
Карбід кремнію	SiO ₂	–	–	0,4 мг/год	Ra = 0,80	[43]
	наноалмаз			0,6 мг/год	Ra = 0,27	
	SiO ₂	2	–20	0,4	0,2	[164]
	CeO ₂	2	55	1,1	0,2	
	SiO ₂	–	–	1,2–1,8	0,30–0,63	[49]
	Al ₂ O ₃	4	–	0,74	Ra = 0,12	[14]
	CeO ₂	–	–	0,42	0,23	[80]
	алмаз			3,62	0,97	
Нітрид галію	SiO ₂	2	–	1,14	1,9	[52]
				1,85	0,8	
	SiO ₂	3	20	0,3	–	[162]
		6	–25	0,7		
		9	–60	0,9		
	Al ₂ O ₃	–	–	0,59	–	[15]
	SiO ₂			0,07	Ra = 0,056	
Кремній	Al ₂ O ₃ , CeO ₂ , SiO ₂	9	–	19,2–41,6	Ra = 10,61–27,61	[93]
	Al ₂ O ₃	11		12	–	[57]
	CeO ₂	10		30		
	CeO ₂	10,5		25	–	[56]
	Al ₂ O ₃	–	45	36	0,4	[165]
	SiO ₂	–	65	22	0,8	[55]
	SiO ₂	10,5	–	7,5	Rz = 1,3	[58]
		11,4	–	36	Rz = 0,9	

МЕХАНІЗМ ФОРМУВАННЯ НАНОПРОФІЛЮ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ТА ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПІД ЧАС ПОЛІРУВАННЯ

При вивченні закономірностей формування нанопрофілю оптичних поверхонь використовується узагальнена модель зняття оброблюваного матеріалу під час полірування, що базується на кластерній моделі й фізико-статистичній моделі утворення та видалення частинок шламу [1, 2, 20, 45, 47, 50, 68, 101, 107, 137].

На основі кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування з використанням квантово-механічної теорії збурень було показано, що ймовірність відриву кластерів з оброблюваної поверхні описується розподілом Пуассона $P(i, v)$ за площами їхньої поверхні, а частинки шламу, що утворюються, мають площу поверхні, кратну мінімальній. При цьому частота коливань кластера пропорційна поверхневій енергії оброблюваного матеріалу, його енергія може здобувати дискретні значення, а його власні функції описуються поліномами Ерміта. Нанорельєф оброблюваної поверхні обумовлюється тим, які частинки шламу утворилися під час полірування, тобто залежить від передісторії її формування. Ймовірність утворення частинки шламу пропорційна ймовірності переходу кластера з будь-якого стану в основний у відповідності до правил відбору і визначається квадратом модуля хвильової функції стану кластера, яка відповідає поверхневій густині частинок шламу і визначає шорсткість поверхні, а також лінійний розмір частинок шламу [1, 2, 137, 166–170].

Утворення та видалення з оброблюваної поверхні частинок шламу відбувається внаслідок накопичування коливальної енергії E_c у кластері, який складається з ξ молекулярних фрагментів, до рівня, що перевищує енергію зв'язку E_b оброблюваного матеріалу. Частинка шламу є паралелепіпедом, сторони якого мають довжину, що визначається числами k_1, k_2, k_3 та кількістю молекулярних фрагментів $\xi = k_1 k_2 k_3$ в частинці шламу. Розмір частинки шламу визначається як діаметр Фере, виходячи з умови рівності площ поверхні сфери і поверхні частинки шламу [106], або як висота відповідних паралелепіпедів $h(i)$ [2, 107]. Залежність висоти нерівностей профілю $z(x)$ від координати описує нанорозмірний рельєф у вигляді терасно-східчастої структури, яка виникає внаслідок видалення з оброблюваної площини частинок шламу у формі паралелепіпеду за умови, що її параметри шорсткості близькі до відстані між сусідніми підрешітками кристалічної комірки [2, 34, 71, 107, 114, 171–174]. За допомогою комп'ютерного моделювання нанопрофілю полірованої поверхні визначаються параметри шорсткості: середнє арифметичне відхилення профілю Ra , середнє квадратичне відхилення профілю Rq (rms) та найбільша висота профілю $Rmax$ (PV).

При вивченні закономірностей полірування сапфіру і застосуванні комп'ютерного моделювання процесу формування площин з різною кристалографічною орієнтацією встановлено, що параметри шорсткості $Ra, Rq, Rmax$ оброблених поверхонь лінійно зростають при збільшенні діелектричної проникності, коефіцієнту теплопровідності, висоти частинок шламу і константи Ліфшиця, яка характеризує енергію взаємодії зерен полірувального порошку з поверхнею, що оброблюється. Показано, що під час полірування площин $a(1\bar{1}20), m(10\bar{1}0), r(10\bar{1}2)$ і $c(0001)$ сапфіру параметри шорсткості полірованих поверхонь характеризуються співвідношенням 0,81:0,83:0,97:1,00. При цьому параметри шорсткості складають: $Ra = 6,7\text{--}8,2$ нм, $Rq = 7,2\text{--}8,8$ нм, $Rmax = 12,1\text{--}14,8$ нм [2, 45, 107].

При механічному поліруванні площини (0001) кристалів з гексагональною структурою (карбіду кремнію, нітриду галію, нітриду алюмінію і сапфіру) за допомогою суспензії алмазного мікропорошку АСМ 2/1 встановлено, що параметри шорсткості лінійно зростають при збільшенні найбільш вірогідних значень розміру, висоти і площі поверхні частинок шламу, а також об'єму елементарної комірки і площі оброблюваної грані кристалу. Вивчено вплив енергії міжмолекулярної взаємодії зерен полірувального порошку і оброблюваної поверхні, що визначається константою Ліфшиця, на шорсткість поверхні і показано, що параметри Ra , Rq і R_{max} обернено пропорційні енергії, яка витрачається на утворення частинки шламу. Відносна шорсткість оброблених поверхонь кристалічних матеріалів SiC, GaN, AlN і Al₂O₃ характеризується співвідношенням 0,68:0,67:0,63:1,00. При цьому параметри шорсткості змінюються в інтервалах: $Ra = 7,5-12,0$ нм, $Rq = 8,0-12,8$ нм, $R_{max} = 13,1-19,6$ нм [2, 68]. Під час полірування одночасно відбувається видалення оброблюваного матеріалу (перенесення маси, що характеризується коефіцієнтом об'ємного зносу η , який лінійно залежить від найбільш ймовірного значення площі поверхні частинок шламу S), і формування нанорельєфу поверхні (видалення частинок шламу, що характеризується параметрами шорсткості, які лінійно залежать від константи Ліфшиця) [45, 106, 107]. Відношення цих параметрів (η/Ra) є інтегральною характеристикою цих процесів і обернено пропорційно залежить від густини коливальної енергії взаємодії полірувального порошку з оброблюваною поверхнею (константою Ліфшиця, віднесеною до площі поверхні частинки шламу) [2, 68].

При поліруванні площини c (0001) кристалів карбіду кремнію за допомогою полірувальних суспензій з алмазного мікропорошку АСМ 2/1, кубічного нітриду бору (КМ 0,5/0), МАХ-фази (Ti₃AlC₂) зернистістю 0,5/0 і колоїдного кремнезему, встановлено, що параметри Ra , Rq і R_{max} характеризується даними наведеними у табл. 2 [45].

Таблиця 2. Параметри шорсткості полірованої поверхні карбіду кремнію

Параметри шорсткості	Полірувальний порошок			
	АСМ	cBN	Ti ₃ AlC ₂	SiO ₂
Ra , нм	5,4±0,1	5,6±0,2	5,1±0,2	4,6±0,1
Rq , нм	5,8±0,2	5,9±0,2	5,4±0,2	4,7±0,1
R_{max} , нм	9,3±0,9	8,2±1,1	7,4±0,5	6,5±0,2

При поліруванні площини a (11 $\bar{2}$ 0) сапфіру за допомогою суспензій з полірувальних порошоків МАХ-фази (Ti₃AlC₂), кубічного нітриду бору (КМ 0,5/0), алмазного мікропорошку (АСМ 2/1), колоїдного кремнезему (SiO₂) і колоїдної оксидної системи (КС) показано, що параметри Ra , Rq і R_{max} характеризується даними наведеними у табл. 3 [45].

При поліруванні оптичних поверхонь деталей зі скла, плавленого кварцу, ситалу, кремнію, сапфіру, карбіду кремнію, нітриду галію інструментом зі зв'язаним полірувальним порошком, потоком полірувальної рідини, за допомогою ультразвукових коливань, а також при магніто-реологічному, механічному та хіміко-механічному поліруванні забезпечується шорсткість оброблених поверхонь за параметром Ra , нм: 1–2 [89, 98], 0,42–1,90 [97], 2,0 [94], 0,3–1,2 [101], 0,14–3,0 [105], 0,2–4,4 [15, 53], 10 [166]; за параметром Rq , нм: 0,25, 0,4–2,0, 1–2 [101], 0,41–0,72 [86], 0,63 [146], 0,25–2,76, $\leq 1,0$ [87],

1,0–10,0 [3]; за параметром R_{\max} , нм: 2,1–10,0, 4–10 [101], 10,24 [83], 70 [166].

Таблиця 3. Параметри шорсткості полірованої поверхні сапфіру

Параметри шорсткості	Полірувальний порошок				
	АСМ	cBN	Ti ₃ AlC ₂	SiO ₂	КС
R_a , нм	6,3±0,3	6,5±0,2	6,4±0,2	2,8±0,2	2,7±0,1
R_q , нм	6,7±0,2	7,0±0,2	6,8±0,3	3,0±0,2	2,9±0,1
R_{\max} , нм	12,3±0,2	12,8±1,4	12,9±1,0	4,7±0,3	4,7±0,2

Поліровані поверхні елементів, підкладок та пластин зі скла, ситалів і оптичних та напівпровідникових кристалів повинні задовольняти вимогам за точністю форми – 3–5 інтерференційних кілець [128, 129, 155], за шорсткістю $R_z = 0,05$ мкм (ГОСТ 2789–73), оптичною чистотою – РПП–PV (ГОСТ 11141–84) або за якістю оброблених поверхонь – S-d (Scratch/dig) від 60–40 до 20–10 (US Military Surface Quality Specification, MIL-PRF-13830B) [1, 2, 43–47, 50, 68, 101, 107, 137, 170]. Поверхні підкладок монокристалічних матеріалів, підготовлені для нанесення епітаксимального шару, повинні задовольняти додатковим вимогам, що регламентують точність орієнтації площини кристала ($\pm 0,2$ – $0,5^\circ$), густину дислокацій (10^3 – 10^4 см⁻²), густину мікропаїпів (< 30 см⁻²), структурну досконалість (FWHM – за напівшириною лінії хитання рентгенодифракційного спектру – 30–50 кут. сек), а також “оптичним” вимогам за неплоскостістю (менше 10 мкм на діаметрі 76,2 мм) і шорсткістю ($R_a = 0,3$ – $1,0$ нм).

При видаленні матеріалу з оброблюваної поверхні під час полірування, яке по суті є оберненим процесом до росту кристалів, можуть утворюватись як атомарно шорсткі, так і атомарно гладенькі поверхні у відповідності до критерію Джексона [171, 175], згідно якому визначається фактор ентропії поверхні

$$\alpha = \frac{zw}{k_B T} \quad (z - \text{загальна кількість можливих зв'язків кластера з найближчими}$$

сусідами в кристалі; w – енергія взаємодії між кластерами на зернах полірувального порошку і на оброблюваній поверхні; T – середня температура в зоні контакту оброблюваної деталі та притиру; $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана). Поліровані поверхні, для яких $\alpha > 5,3$, є атомарно гладенькими, а поверхні, для яких $\alpha < 2$, є атомарно шорсткими. При поліруванні площин m , c , a і r сапфіру ($z = 4$), коли $T = 300$ К, а енергія взаємодії $w = A_L$, розрахункові значення фактору Джексона складають: $\alpha = (5,4, 9,0, 5,4, 7,4) > 5,3$. Це означає, що під час полірування площин m , c , a і r сапфіру можливе формування атомарно гладеньких поверхонь [2, 107].

Надгладенькі поверхні деталей електронної техніки і оптичних систем зазвичай є східчасто-терасними структурами, які характеризуються висотою та шириною сходинок, а також кутом орієнтації оброблюваної площини [34, 114, 119, 172–174]. Для визначення мінімально припустимих значень параметрів шорсткості надгладеньких поверхонь прийняте очевидне припущення, що $\min\{R_a, R_q, R_{\max}\}$ відповідає мінімальній кількості ступенів на оброблюваній площі – 1, а висота цієї сходинки h точно дорівнює міжплощинній відстані l , яка для площин c , m , a і r сапфіру дорівнює 2,165, 1,374, 2,379 і 3,479 Å відповідно. В зв'язку з цим нанопрофіль такої поверхні описується функцією

$z(x) = hH(x - L/2)$ (L – базова лінія профілограми; $H(x) = \begin{cases} 0, x < 0 \\ 1, x \geq 0 \end{cases}$ – функція

Гевісайда), а параметри шорсткості дорівнюють $R_{a0} = h/2$, $R_{q0} = h/\sqrt{2}$ і $R_{max0} = h$. Для площин m , c , a і r сапфіру мінімально припустимі значення параметрів шорсткості наведено у табл. 4 [2, 107].

Таблиця 4. Мінімально припустимі значення параметрів шорсткості полірованої поверхні сапфіру

Параметри шорсткості	Площина сапфіру			
	m (10 $\bar{1}0$)	c (0001)	a (11 $\bar{2}0$)	r (10 $\bar{1}2$)
R_{a0} , Å	0,687	1,083	1,190	1,740
R_{q0} , Å	0,971	1,531	1,682	2,460
R_{max0} , Å	1,374	2,165	2,379	3,479

Надгладенькі оптичні поверхні деталей електронної техніки й оптичних систем отримують при хіміко-механічному поліруванні [15, 16, 26, 30, 71, 111, 114, 160, 161, 163, 173, 174, 176], гідродинамічному, магніто-реологічному, лазерному поліруванні [78, 96, 177–179], іонно-променевому розпиленні [180] тощо. При хіміко-механічному поліруванні сапфіру за допомогою колоїдних систем із наночастинок полірувальних порошоків забезпечується можливість отримання поверхонь з “ангстремною” шорсткістю: $Ra < 3$ Å, $R = 3$ Å [40]; $Ra = 0,677$ – $2,9$ Å, $Rq = 3,6$ Å [160]; $Ra = 0,62$ – $1,06$ Å [30]; $Ra = 0,63$ Å [173]; $Rq = 6,83$ Å [161].

Параметри шорсткості надгладеньких оптичних поверхонь дорівнюють:

- при поліруванні оптичного скла: $Rq = 9,2$ Å, $R_{a0} = 3$ Å [178], $Ra = 14$ Å [96], $Rq = 2,72$ Å [26], $Ra \approx 12,5$ Å [163];
- при поліруванні кварцу: $0,586$ Å [177], $5,0$ Å [176], $1,56$ Å [179], $0,8$ – $2,1$ Å [180];
- при поліруванні ситалів (Zerodur): $Rq = 2,5$ – $3,4$ Å [178], $Rq = 7,16$ – $14,97$ Å [111].

При поліруванні карбїду кремнію параметри шорсткості надгладеньких оптичних поверхонь дорівнюють: $R_{a0} = 1,4$ – $3,6$ Å [178], а при поліруванні нітриду галію – $Rq = 0,80$ – $0,94$ Å, $R_{a0} = 1,0$ Å [78], $Ra = 0,523$ Å [16], $Ra = 0,56$ Å [15].

ВИСНОВОК

Аналіз сучасного стану проблеми полірування прецизійних поверхонь елементів електронної техніки й оптичних систем зі скла, ситалів, оптичних і напівпровідникових кристалів, показав, що на теперішній час механізми видалення матеріалу з оброблюваної поверхні під час полірування та формування нанопрофілю оптичних поверхонь є достатньо вивченими, що забезпечило широке використання новітніх технологій полірування в приладобудуванні й аерокосмічній техніці. Показано також, що для досягнення надзвичайно високої якості елементів оптико-електронної техніки необхідно вирішити найбільш актуальну проблему формування надгладеньких поверхонь, що може бути досягнуто за рахунок пошуку нових полірувальних матеріалів та умов полірування, за яких забезпечуються екологічні умови оптичного виробництва при виключенні чи обмеженні використанні хімічних агресивних середовищ.

Рассмотрены работы по созданию современных методов полирования прецизионных поверхностей элементов электронной техники и оптических систем из стекла, оптических и полупроводниковых кристаллов. Описан механизм удаления материала с обрабатываемой поверхности во время полирования инструментом со связанным полировальным порошком, при механическом полировании суспензией полировальных порошков и при химико-механическом полировании. Приведены результаты исследования механизма формирования нанопрофиля оптических поверхностей при полировании и отмечена актуальность изучения закономерностей образования сверхгладких поверхностей при химико-механическом полировании.

Ключевые слова: полирование, скорость удаления материала, шероховатость поверхности.

Considered the work on the creation of modern methods of polishing precision surfaces of elements of electronic equipment and optical systems of glass, optical and semiconductor crystals. A mechanism is described for material removal from the surface to be treated during polishing with a bond-abrasive tool, during mechanical polishing with a suspension of polishing powders, and during chemical-mechanical polishing. The results of the study of the mechanism of the formation of a nanoprofile optical surfaces during polishing are given and the relevance of studying the laws of the formation of ultra-smooth surfaces during chemical-mechanical polishing is noted.

Keywords: polishing, material removal rate, surface roughness.

1. Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Ковальов С.В. Фізичні засади формоутворення прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів: Монографія. Київ: Наук. думка, 2017. 248 с.
2. Filatov Yu.D. Modeling and experimental study of surfaces optoelectronic elements from crystal materials in polishing *Simulation and experiments of material-oriented ultra-precision machining, springer tracts in mechanical engineering*. / eds. J. Zhang et al. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. P. 129–165.
3. Suratwala T.I. Materials science and technology of optical fabricationby. US, Wiley, 2018. 416 p.
4. Babu S. Advances in chemical mechanical planarization (CMP). *Woodh. Publ.g Ser. Electron. Opt. Mater.* 2016. 536 p.
5. Landis A.C. Factors influencing material removal and surface finish of the polishing of silica glasses. Charlotte: The University of North Carolina, 2006. 106 p.
6. Sivanandini M., Dhami S.S., Pabla B.S. Chemical mechanical polishing by colloidal silica slurry. *Int. J. Eng. Res. Appl. (IJERA)*. 2013. Vol. 3, iss. 3. P. 1337–1345.
7. Kwon T.-Y., Ramachandran M., Park J.-G. Scratch formation and its mechanism in chemical mechanical planarization (CMP). *Friction*. 2013. Vol. 1, iss. 4. P. 279–305.
8. Sivanandini M., Dhami S.S., Pabla B.S. Material removal by chemical mechanical polishing – A Review. *Int. J. Adv. Rech. & Technol. (IJOART)*. 2012. Vol. 1, iss. 5. P. 1–8.
9. Wang Y.G., Zhang L.C. On the chemo-mechanical polishing for nano-scale surface finish of brittle wafers. *Recent Pat. Nanotech.* 2010. Vol. 4, no. 2. P. 70–77.
10. Alias M.S., Tangi M., Holguin-Lerma J.A., Stegenburgs E., Alatawi A.A., Ashry I., Subedi R.Ch., Priante D., Shakfa M.K., Khee Ng T., Ooi B.S. Review of nanophotonics approaches using nanostructures and nanofabrication for III-nitrides ultraviolet-photonic devices. *J. Nanophotonics*. 2018. Vol. 12, no. 4. P. 043508.
11. Doi T. Current status and future prospects os GaN substrates for green devices. *Sens. Mater.* 2013. Vol. 25, no. 3. P. 141–154.
12. Suratwala T., Steele W., Feit M., Shen N., Dylla-Spears R., Wong L., Elhadj S. Mechanism and simulation of removal rate and surface roughness during optical polishing of glasses. *J. Am. Ceram. Soc.* 2016. Vol. 99, no. 6. P. 1974–1984.
13. Kawabata K., Fujimoto K., Miyamoto K. The elastic impact of polishing pad for sapphire polishing. *Nitta Haas Incorporated*. 2015. P. 107–110.
14. Ho J.-K., Huang C.-Y., Tsai M.-Y., Tsai C.-C. Investigation of polishing pads impregnated with Fe and Al₂O₃ particle for single-crystal silicon carbide wafers. *Appl. Sci.* 2016. Vol. 6. P. 89–96.

15. Zou C., Pan G., Shi X., Gong H., Zhou Y. Atomically smooth gallium nitride surface prepared by chemical-mechanical polishing with different abrasives. *Proc. IMechE Part J: J. Eng. Tribol.* 2014. Vol. 228, no. 10. P. 1144–1150.
16. Gong H., Pan G., Zhou Y., Shi X., Zou C., Zhang S. Investigation on the surface characterization of Ga-faced GaN after chemical-mechanical polishing. *Appl. Surf. Sci.* 2015. Vol. 338. P. 85–91.
17. Yuan Z., Zheng P., Wen Q., He Y. Chemical kinetics mechanism for chemical mechanical polishing diamond and its related hard-inert materials. *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2018. Vol. 95, iss. 5–8. P. 1715–1727.
18. Filatov A.Yu., Sidorko V.I. Localization of fragments of a deposit on the workpiece surface in polishing nonmetallic materials. *J. Superhard Mater.* 2011. Vol. 33, iss. 5. P. 340–351.
19. Filatov Yu.D., Polishing of aluminosilicate materials with bound-abrasive tools. *J. Superhard Mater.* 2001. Vol. 23, iss. 3. P. 32–42.
20. Filatov Yu.D. Bound-abrasive polishing of precision surfaces of nonmetallic materials. *J. Superhard Mater.* 2008. Vol. 30, iss. 1. P. 44–49.
21. Shahinian H., Cherukuri H., Mullany B. Evaluation of fiber-based tools for glass polishing using experimental and computational approaches. *Appl. Optics.* 2016. Vol. 55, iss. 16. P. 4307–4316.
22. Desai J.N. Advances and processes in Precision Glass Polishing Techniques. University of Florida, 2009. P. 1–12.
23. Bo D., Jianwei Z., Yuling L., Mingbin S., Yufeng Z. Surface roughness of optical quartz substrate by chemical mechanical polishing. *J. Semicond.* 2014. Vol. 35, no. 11, art. 116001.
24. Lee H.S., Jeong H.D., Dornfeld D.A. Semi-empirical material removal rate distribution model for SiO₂ chemical mechanical polishing (CMP) processes. *Precis. Eng.* 2013. Vol. 37. P. 483–490.
25. Zhang Z., Liu W., Song Z. Particle size and surfactant effects on chemical mechanical polishing of glass using silica-based slurry. *Appl. Opt.* 2010. Vol. 49, iss. 28. P. 5480–5485.
26. Peng W.Q., Guan C.L., Li S.Y. Material removal mechanism of ceria particles with different sizes in glass polishing. *Opt. Eng.* 2014. V. 53, no. 3. P. 035104.
27. Hoshino T., Kurata Y., Terasaki Y., Susa K. Mechanism of polishing of SiO₂ by CeO₂ particles. *J. Non-Crystalline Solids.* 2001. Vol. 283. P. 129–136.
28. Mounir H., Hamdi A., Aliouane T., Bouzid D. Study of the pressure distribution during the optical glass polishing. *Recueil de Mécanique.* 2017. Vol. 2, no. 1. P. 136–143.
29. Lin Z.-C., Huang W.-S., Tsai J.-S. A study of materials removal amount of sapphire wafer in application of chemical mechanical polishing with different polishing pads. *J. Mech. Sci. Technol.* 2012. Vol. 26, iss. 8. P. 2353–2364.
30. Zhou Y., Pan G., Gong H., Shi X., Chunli Z. Characterization of sapphire chemical mechanical polishing performances using silica with different sizes and their removal mechanisms. *Colloid. Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2017. Vol. 513. P. 153–159.
31. Deng Q.F., Zhou Z.X., Zhou Z.Z., Yuan J.L., Wang J.C. A study of the solid-state reaction for polishing sapphires. *Adv. Mater. Res.* 2012. Vol. 497. P. 195–199.
32. Xu Y., Lu J., Xu X. The research of reactivity between nano-abrasives and sapphire during polishing process. *Integr. Ferroelectr.* 2015. Vol. 159. P. 41–48.
33. Xu Y., Lu J., Xu X. Study on planarization machining of sapphire wafer with soft-hard mixed abrasive through mechanical chemical polishing. *Appl. Surf. Sci.* 2016. Vol. 389. P. 713–72.
34. Cuccureddu F., Murphy S., Shvets I.V., Porcu M., Zandbergen M., Sidorov N.S., Bozhko S.I. Surface morphology of c-plane sapphire (a-alumina) produced by high temperature anneal. *Surface Sci.* 2010. Vol. 604, no. 15–16. P. 1294–1299.
35. Vodenitcharova T., Zhang L.C., Zarudi I., Yin Y., Domyo H., Ho T., Sato M. The effect of anisotropy on the deformation and fracture of sapphire wafers subjected to thermal shocks. *J. Mater. Proc. Technol.* 2007. Vol. 194. P. 52–62.
36. Zhang Z., Zhang W., Zhang S., Yan W. Study on chemical mechanical polishing performances of sapphire wafer (0001) using silica-based slurry. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2017. Vol. 6, no. 10. P. 723–727.
37. Uneda M., Takano K., Koyama K., Aida H., Ishikawa K. Analysis of sapphire-chemical mechanical polishing using digital image processing. *Mech. Eng. J.* 2016. Vol. 3, no 1. P. 1–11.
38. Yan W., Zhang Z., Guo X., Liu W., Song Z. The effect of pH on sapphire chemical mechanical polishing. *ECSJ, Solid State Sci. Technol.* 2015. Vol. 4, iss. 3. P. 108–111.

39. Wu K., Yamazaki N., Ebina Y., Zhou L., Shimizu J., Onuki T., Ojima H., Fujiwara T. Study on sapphire wafer grinding by Chromium oxide (Cr_2O_3) wheel. *Adv. Mater. Res.* 2016. Vol. 1136. P. 311–316.
40. Budnikov A.T., Vovk E.A., Krivonogov S.I., Danko A.Ya., Lukiyenko O.A. Anisotropy of sapphire properties associated with chemical-mechanical polishing with silica. *Funct. Mater.* 2010. Vol. 17, no. 4. P. 488–494.
41. Vovk E.A. Deagglomeration of aerosil in polishing suspension for chemical-mechanical polishing of sapphire. *Funct. Mater.* 2015. Vol. 22, no 1. P. 110–115.
42. Vovk E.A., Chemical-mechanical polishing of sapphire by polishing suspension based on aerosil. *Funct. Mater.* 2015. Vol. 22, no 2. P. 252–257.
43. Lee H., Park B., Jeong S., Joo S., Jeong H., The effect of mixed a brasive slurry on CMP of 6H-SiC substrates. *J. Ceram. Proc. Res.* 2009. Vol. 10, no. 3. P. 378–381.
44. Prikhna T.A., Starostina A.V., Lizkendorf D., Petrusha I.A., Ivakhnenko S.A., Borimskii 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., Kovlyayev 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, iss. 1. C. 9–17.
45. Filatov O.Yu., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Filatov Yu.D. Polishing substrates of single crystal silicon carbide and sapphire for optoelectronics. *Funct. Mater.* 2016. Vol. 23, no. 1. P. 104–110.
46. Filatov Yu.D., Vetrov A.G., Sidorko V.I., Filatov A.Yu., Kovalev S.V. A mechanism of diamondabrasive finishing of monocrystalline silicon carbide. *J. Superhard Mater.* 2013. Vol. 35, iss. 5. P. 303–308.
47. 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., Borimskii A.I., Katsai A.M., Poltoratskii V.G. Polishing of optoelectronic components made of monocrystalline silicon carbide. *J. Superhard Mater.* 2015. Vol. 37, iss. 1. P. 48–56.
48. Jiang F., Liu Y., Yang Y., Huang Z.-R., Li D., Liu G.-I., Liu X.-J. Research progress of optical fabrication and surface-microstructure modification of SiC. *J. Nanomaterials.* 2012. Vol. 2012, art. ID 984048. P 1–9.
49. Lee H., Jeong S., Seo H., Park B., Oh J., Jeong H., Kim H. Experimental analysis on CMP mechanism of single crystal SiC. *Int. Conf. on Planarization / CMP Technol.* Dresden VDE, VERLAG GMBH, Berlin-Offenbach, 2007.
50. Filatov Yu.D. Diamond polishing of crystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, iss. 6. P. 427–433.
51. Куэй П. Электроника на основе нитрида галлия. Мир электроники. Москва: Техносфера. 2011. 592 с.
52. Asghar K., Das D. Influence of Polishing Parameters on Abrasive Free Chemical Mechanical Planarization (AFCMP) of Non-Polar (11-20) and Semi-Polar (11-22) GaN Surfaces. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2015. Vol. 4, iss. 7. P. 242–250.
53. Aida H., Takeda H., Kim S.-W., Aota N., Koyama K., Yamazaki T., Doi T. Evaluation of subsurface damage in GaN substrate induced by mechanical polishing with diamond abrasives. *Appl. Surface Sci.* 2014. Vol. 292. P. 531–536.
54. Ding K., Avrutin V., Özgür Ü., Morkoç H., Status of growth of group iii-nitride heterostructures for deep ultraviolet light-emitting diodes. *Crystals.* 2017. Vol. 7, no. 300. P. 1–22.
55. Ilie F., Tribochemical interaction between nanoparticles and surfaces of selective layer during chemical mechanical polishing. *J. Nanopart. Res.* 2013. Vol. 15. P. 1997.
56. Song X., Xu D., Zhang X., Shi X., Jiang N., Qiu G., Electrochemical behavior and polishing properties of silicon wafer in alkaline slurry with abrasive CeO_2 . *Transact. Nonfer. Metals Soc. China.* 2008. Vol. 18, iss. 1. P. 178–182.
57. Wang Y.G., Zhang L.C., Biddut A., Chemical effect on the material removal rate in the CMP of silicon wafer. *Wear.* 2011. Vol. 270. P. 312–316.
58. Косенок Я.А., Гайшун В.Е., Тюленкова О.И., Денисман В.Г. Водные композиции на основе наноразмерных частиц диоксида кремния для химико-механической полировки пластин монокристаллического кремния. *Проблемы физики, математики и техники.* 2014. Т. 3, № 20. С. 26–31.
59. Singh R., Garg H., Pabla B.S., Sharma R., Bhagel P. Study and evaluation of parameters for high finish of germanium substrates. *Int. J. Comput. Appl.* 2015. P. 23–26.

60. Song Z., Liu W., Wang L. Chemical mechanical polishing slurry for amorphous Ge₂Sb₂Te₅. *Proc. Eng.* 2015. Vol. 102. P. 582–589.
61. Levchenko I.V., Tomashyk V.M., Stratiychuk I.B., Malanych G.P., Stanetska A.S., Korchovyi A.A., Chemical polishing of InAs, InSb, GaAs and GaSb. *Funct. Mater.* 2017. Vol. 24, no. 4. P. 654–659.
62. Sofronov D.S., Oreshina A.O., Bryleva E.Yu., Sofronova E.M., Mateichenko P.V., Puzan A.N. Effect of CuS, Mn₃O₄ and CeO₂ additives on Co(II) sorption by ZnS particles. *Funct. Mater.* 2017. Vol. 24, no. 4. P. 667–672.
63. Ilie F., Ipate G. Chemical-mechanical impact of nanoparticle and pH effect of the slurry on the CMP of the selective layer surfaces. *Lubricants.* 2017. Vol. 5, no. 15. P. 1–12.
64. Kubota A., Nagae S., Motoyama S., Touge M. Two-step polishing technique for single crystal diamond (100) substrate utilizing a chemical reaction with iron plate. *Diamond Relat. Mater.* 2015. Vol. 60. P. 75–80.
65. Natsuo Tatsumi, Katsuko Harano, Toshimichi Ito, Hitoshi Sumiya. Polishing mechanism and surface damage analysis of type IIa single crystal diamond processed by mechanical and chemical polishing methods. *Diamond Relat. Mater.* 2016. Vol. 63. P. 80–85.
66. Ralchenko V.G., Ashkinazi E.E., Zavedeev E.V., Khomich A.A., Bolshakov A.P., Ryzhkov S.G., Sovyk D.N., Shershulin V.A., Yurov V.Yu., Rudnev V.V. High-rate ultrasonic polishing of polycrystalline diamond films. *Diamond Relat. Mater.* 2016. Vol. 66. P. 171–176.
67. Werrell J.M., Mandal S., Thomas E.L.H., Brousseau E.B., Lewis R., Borri P., Davies Ph.R., Williams O.A. Effect of slurry composition on the chemical mechanical polishing of thin diamond films. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2017. Vol. 18, no. 1. P. 654–663.
68. Filatov Yu.D. Surface roughness of optoelectronic components in mechanical polishing. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, iss. 1. C. 52–57.
69. Lu J., Li Y., Xu X. The effects of abrasive yielding on the polishing of SiC wafers using a semi-fixed flexible pad. *Proc. IMechE. Part B: J. Eng. Manufact.* 2015. Vol. 229. P. 170–177.
70. Pal R.K., Garg H., Sarepaka R.G.V., Baghel P. Friction at workpiece-polisher interface during optical polishing process. *IJME.* 2014. Vol. 1, iss. 1. P. 32–35.
71. Deng H., Endo K., Yamamura K. Competition between surface modification and abrasive polishing: a method of controlling the surface atomic structure of 4H-SiC (0001). *Sci. Report.* 2015. Vol. 5, art. 8947. P. 1–6.
72. Janoš P., Ederer J., Pilařová V., Henych J., Tolasz J., Milde D., Opletal T. Chemical mechanical glass polishing with cerium oxide: Effect of selected physico-chemical characteristics on polishing efficiency. *Wear.* 2016. Vol. 362–363. P. 114–120.
73. Ward J.A., Fowler A.C., O'Brien S.Bg., Acid polishing of lead glass. *J. Math. Industry.* 2011. Vol. 1, no. 1. P. 1–18.
74. Ünal M., Bender D., Balbasi Ö.B. Kabukcuoglu M.P., Ergunt Y., Turan R., Optimization of chemical polishing by bromine-alcohol for detector-grade CdZnTe crystals and its effect on contacts (Conference Presentation). *Proc. SPIE.* 2018. Vol. 10762.
75. Wang P., Gao R.X., Yan R. A deep learning-based approach to material removal rate prediction in polishing. *CIRP Annals.* 2017. Vol. 66, iss. 1. P. 429–432.
76. Deng H. Development of plasma-assisted polishing for highly efficient and damage-free finishing of single-crystal SiC, GaN and CVD-SiC. Doctoral Dissertation, January 2016, Graduate School of Engineering, Osaka University. 168 p.
77. Jain V.K. Magnetic field assisted abrasive based micro-/nano-finishing. *J. Mater. Proc. Technol.* 2009. Vol. 209. P. 6022–6038.
78. Murata J., Sadakuni S., Okamoto T., Hattori A.N., Yagi K., Sano Y., Arima K., Yamauchi K. Structural and chemical characteristics of atomically smooth GaN surfaces prepared by abrasive-free polishing with Pt catalyst. *J. Crystal Growth.* 2012. Vol. 349, iss. 1. P. 83–88.
79. Sano Y., Arima K., Yamauchi K. Planarization of SiC and GaN wafers using polishing technique utilizing catalyst surface reaction. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2013. Vol. 2, iss. 8. P. 3028–3035.
80. Deng H., Hosoya K., Imanishi Y., Endo K., Yamamura K. Electro-chemical mechanical polishing of single-crystal SiC using CeO₂ slurry. *Electrochem. Commun.* 2015. Vol. 52. P. 5–8.
81. Tu Q., Shen X., Zhou J., He X., Yamamura K. Efficient processing of reaction-sintered silicon carbide by anodically oxidation-assisted polishing. *Optical Eng.* 2015. Vol. 54, no. 10, art. 105113.
82. Yuan Z., He Y., Sun X., Wen Q. UV-TiO₂ photocatalysis-assisted chemical mechanical polishing 4H-SiC wafer. *Mater. Manufacturing Proc.* 2018. Vol. 33, iss. 11. P. 1214–1222.

83. Wang R.J., Wang C.Y., Wen W., Wang J. Experimental study on a micro-abrasive slurry jet for glass polishing. *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2017. Vol. 89, iss. 1–4. P. 451–462.
84. Fang H., Guo P., Yu J. Surface roughness and material removal in fluid jet polishing. *Appl. Optics.* 2006. Vol. 45, iss. 17. P. 4012–4019.
85. Amin A.E. Fluid jet polishing of glass material. *Thesis submitted for completion of Master of Science in Mechanical Engineering with emphasis on Structural Mechanics.* Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology Karlskrona, Sweden, 2013. 84 p.
86. Peng W., Li S., Guan C., Shen X., Dai Y., Wang Z. Improvement of magnetorheological finishing surface quality by nano-particles jet polishing. *Opt. Eng.* 2013. Vol. 52, no. 4, art. 043401.
87. Zhou C., Zhang Q., He C., Yaguo Li Y. Function of liquid and tool wear in ultrasonic bound-abrasive polishing of fused silica with different polishing tools. *Optik-Int. J. Light Electron Optics.* 2014. Vol. 125, iss. 15. P. 4064–4068.
88. Fu Y., Li Y. Glass polishing with bound-abrasive vibrating polishing tools. *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 2014. Vol. 16, no. 1–2. P. 70–75.
89. Li Y., Wu Y. Hybrid polishing of fused silica glass with bound-abrasive polishers in conjunction with vibration. *Proc. of SPIE.* 2012. Vol. 8486, art. 84860N-1–14.
90. Li L., He Q., Zheng M., Liu Z. Contribution of ultrasonic travelling wave to chemical-mechanical polishing. *Ultrasonics.* 2015. Vol. 56. P. 530–538.
91. Xu W., Lu X., Pan G., Lei Y., Luo J. Ultrasonic flexural vibration assisted chemical mechanical polishing for sapphire substrate. *Appl. Surface Sci.* 2010. Vol. 256, iss. 12. P. 3936–3940.
92. Liu D., Yan R., Chen T. Material removal model of ultrasonic elliptical vibration-assisted chemical mechanical polishing for hard and brittle materials. *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2017. Vol. 92, iss. 1–4. P. 81–99.
93. Liu D., Chen T., Yan R. Combined ultrasonic elliptical vibration and chemical mechanical polishing monocrystalline silicon. *MATEC Web Conf.* 2016. Vol. 82. P. 1–10.
94. Li Y., Wu Y., Wang J., Yang W., Guo Y., Xu Q. Tentative investigation towards precision polishing of optical components with ultrasonically vibrating bound-abrasive pellets. *Optics Express.* 2012. Vol. 20, no. 1. P. 568–575.
95. Pan J., Yan Q., Material removal mechanism of cluster magnetorheological effect in plane polishing. *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2015. Vol. 81, iss. 9. P. 2017–2026.
96. Zhu J., Lu J., Pan J., Yan Q., Xu X. Study of cluster magnetorheological-chemical mechanical polishing technology for the atomic scale ultra-smooth surface planarization of SiC. *Adv. Mater. Res.* 2013. Vol. 797. P. 284–290.
97. Pan J., Yan Q., Xu X., Zhu J., Wu Z., Bai Z. Abrasive particles trajectory analysis and simulation of cluster magnetorheological effect plane polishing. *Phys. Proced.* 2012. Vol. 25. P. 176–184.
98. Rogov V.V. Physicochemistry in processes of the formation of functional surfaces of glass and sapphire (α -Al₂O₃) components for electronics and optical systems in tribochemical polishing. *J. Superhard Mater.* 2009. Vol. 31, iss. 4. C. 267–273.
99. Fomin A.V., Pashchenko G.A., Kravetskiy M.Yu., Lutsyshyn I.G. Model of smoothing roughness on GaAs wafer surface by using nonabrasive chemical-and-mechanical polishing. *Semiconduct. Phys. Quant. Electron. Optoelectron.* 2017. V. 20, no. 1. P. 118–122.
100. Pashchenko G.A., Kravetskiy M.Yu., Fomin A.V. Modeling the process of removal aimed at cut traces on semiconductor wafers by using the method of contactless chemical-and-dynamical polishing. *Semicond. Phys. Quant. Electron. Optoelectron.* 2015. Vol. 18, no. 3. P. 330–333.
101. Rogov V.V., Filatov Y.D., Kottler W., Sobol V.P. New technology of precision polishing of glass optic. *Optical Eng.* 2001. Vol. 40. P. 1641–1645.
102. Filatov Y.D., Filatov O.Y., Monteil G., Heisel U., Storchak M.G. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials. *Optical Eng.* 2011. Vol. 50, iss. 6, art. 063401.
103. Filatov Yu.D., Filatov O.Y., Monteil G., Heisel U., Storchak M.G. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials. *Proc. SPIE. Optical Eng.+Appl.* 2010. Vol. 7786. P. 77861–77869.
104. Скрябин В.В., Филатов Ю.Д., Сидорко В.И. Закономерности полирования изделий из алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком. *Сверхтв. материалы.* 2004. № 6. С. 73–78.

105. Wu Y., Yang W., Fujimoto M., Zhou L. Mirror surface finishing of silicon wafer edge using ultrasonic assisted fixed-abrasive CMP (UF-CMP). *Int. J. Automat. Technol.* 2013. Vol. 7, no. 6. P. 663–670.
106. Filatov O. Yu., Sidorko V. I., Kovalev S. V., Filatov Yu. D., Vetrov A. G. Material removal rate in polishing anisotropic monocrystalline materials for optoelectronics. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, iss. 2. P. 123–131.
107. 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, iss. 3. P. 197–206.
108. Филатов Ю.Д., Сидорко В.И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании. *Сверхтв. материалы.* 2005. № 1. С. 58–66.
109. Vukkadala P., Turner K.T., Sinha J.K. Impact of wafer geometry on CMP for advanced nodes. *J. Electrochem. Soc.* 2011. Vol. 158, no. 10. P. 1002–1009.
110. Gokhale K.S., Moudgil B.M. Particle technology in chemical mechanical planarization. *KONA Power Particle J.* 2007. No. 25. P. 88–96.
111. Hoyo J.D., Kim D.W., Burge J.H. Super-smooth optical fabrication controlling high spatial frequency surface irregularity. *Optical Manufact. Test. X / Proc. SPIE.* 2013. Vol. 8838, art. 88380T.
112. Téllez-Arriaga L., Cordero-Dávila A., Robledo-Sánchez C.I., Cuautle-Cortés J. Correction of the Preston equation for low speeds. *Appl. Opt.* 2007. Vol. 46, no. 9. P. 1408.
113. Lee H., Park Y., Lee S., Jeong H. Effect of wafer size on material removal rate and its distribution in chemical mechanical polishing of silicon dioxide film. *J. Mech. Sci. Technol.* 2013. Vol. 27, iss. 10. P. 2911–2916.
114. Zhou Y., Pan G. Effects of ultra-smooth surface atomic step morphology on chemical mechanical polishing (CMP) performances of sapphire and SiC wafers. *Tribol. Int.* 2015. Vol. 87. P. 145–150.
115. Cordero-Dávila A., Izazaga-Pérez R., González-García J., Cuautle-Cortés J. Polisher density into Preston equation. *Optik-Int. J. Light Electron Optics.* 2013. Vol. 124, no. 19. P. 3909–3912.
116. Surawala T.I., Feit M.D., Steele W.A. Material removal and surface figure during pad polishing of fused silica. *J. Am. Ceram. Soc.* 2010. Vol. 93, no. 5. P. 1325–1340.
117. Feng Y., Wu H., Cheng H., Tool removal function modelling and processing parameters optimization for bonnet polishing. *Int. J. Optomechanics.* 2016. Vol. 10, no. 3–4. P. 141–153.
118. Si L., Guo D., Luo J., Lu X. Monoatomic layer removal mechanism in chemical mechanical polishing process: A molecular dynamics study. *J. Appl. Phys.* 2010. V. 107, no. 6, art. 064310.
119. Chen H., Guo D., Xie G., Pan G., Mechanical model of nanoparticles for material removal in chemical mechanical polishing process. *Friction.* 2016. Vol. 4, no. 2. P. 153–164.
120. Kelm A., Boerret R., Sinzinger S. Improving the polishing accuracy by determining the variance of the friction coefficient. *J. Eur. Opt. Soc. Rap. Pub.* 2012. Vol. 7. P. 12049.
121. Zhao D., Lu X. Chemical mechanical polishing: Theory and experiment. *Friction.* 2013. Vol. 1, no. 4. P. 306–326.
122. Liu H., Wu F., Zeng Z., Fan B., Wan Y. Edge effect modeling and experiments on active lap processing. *Opt Express.* 2014. Vol. 22, no. 9. P. 10761–74.
123. Li H., Walker D., Yu G., Zhang W. Modeling and validation of polishing tool influence functions for manufacturing segments for an extremely large telescope. *Appl. Opt.* 2013. Vol. 52, no. 23. P. 5781–7.
124. Li H., Walker D., Yu G., Zhang W. Modeling and validation of polishing tool influence functions for manufacturing segments for an extremely large telescope. *Appl. Opt.* 2013. Vol. 52, no. 23. P. 5781–5787.
125. Korkmaz S., Vahdat A.S., Trotsenko O., Minko S., Babu S.V. AFM-based study of the interaction forces between ceria, silicon dioxide and polyurethane pad during non-Prestonian polishing of silicon dioxide films. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2015. Vol. 4, no. 11. P. 5016–5020.
126. Oh S., Seok J. An integrated material removal model for silicon dioxide layers in chemical mechanical polishing processes. *Wear.* 2009. Vol. 266, iss. 7–8. P. 839–849.
127. Korkmaz S., Babu S.V. Ceria-based slurries for non-prestonian removal of silicon dioxide films. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2014. Vol. 4, no. 2. P36–P41.

128. Filatov Yu. D., Sidorko V. I., Kovalev S. V., Vetrov A. G. Formation of flat surfaces of optoelectronic components in diamond polishing. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, iss. 2. P. 129–133.
129. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Filatov O.Yu., Monteil G. In-process monitoring of shape accuracy of flat surfaces of optical and microelectronic components in polishing. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, iss. 4. P. 282–287.
130. Bambrick S., Bechtold M., DeFisher S., Mohring D. Ogive and free-form polishing with ultraform finishing. *Proc. of SPIE.* 2013. Vol. 8016. P. 1–7.
131. Kim D.W., Park W.H., Kim S.W., Burge J.H. Parametric modeling of edge effects for polishing tool influence functions. *Opt. Express.* 2009. Vol. 17, no. 7. P. 5656–65.
132. Dong Z., Cheng H., Tam H.Y. Compensating for velocity truncation during subaperture polishing by controllable and time-variant tool influence functions. *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54, no. 5. P. 1167–74.
133. Rao Z., Guo B., Zhao Q. Investigation of contact pressure and influence function model for soft wheel polishing. *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54, no. 27. P. 8091–8099.
134. Shu Y., Nie X., Shi F., Li S. Smoothing evolution model for computer controlled optical surfacing. *J. Opt. Technol.* 2014. Vol. 81, iss. 3. P. 164–167.
135. Филатов Ю.Д., Рогов В.В. Кластерная модель механизма усталостного износа SiO₂-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия. Ч. 1. *Сверхтв. материалы.* 1994. № 3. С. 40–43.
136. Филатов Ю.Д., Рогов В.В. Кластерная модель механизма усталостного износа SiO₂-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия. Ч. 2. *Сверхтв. материалы.* 1994. № 4. С. 48–52.
137. Филатов Ю.Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла. *Сверхтв. материалы.* 1991. № 5. С. 61–65.
138. Кац Е.И. Силы Ван-дер-Ваальса, Казимира и Лифшица в мягкой материи. *Успехи физ. наук.* 2015. Т. 185, № 9. С. 964–969.
139. Дерягин Б.В., Абрикосова И.И., Лифшиц Е.М. Молекулярное притяжение конденсированных тел. *Успехи физ. наук.* 2015. Т. 185, № 9. С. 981–1001.
140. Pinchuk P., Jiang K. Size-dependent Hamaker constants for silver and gold nanoparticles. *Proc. SPIE., Phys. Chem. Interfac. Nanomater. XIV.* 2015. Vol. 9549. P. 1–7.
141. Leong Y.K., Ong B.C. Critical zeta potential and the Hamaker constant of oxides in water. *Powder Technology.* 2003. Vol. 134, no. 3. P. 249–254.
142. Takenaga M., Jo S., Graupe M., Lee T.R. Effective van der Waals surface energy of self-assembled monolayer films having systematically varying degrees of molecular fluorination. *J. Colloid Int. Sci.* 2008. Vol. 320. P. 264–267.
143. Nguyen A.V. Improved approximation of water dielectric permittivity for calculation of Hamaker constants. *J. Colloid Int. Sci.* 2000. Vol. 229, iss. 2. P. 648–651.
144. Bozkaya D., Müftü S. Effects of surface forces on material removal rate in chemical mechanical planarization. *J. Electrochem. Soc.* 2010. Vol. 157, iss. 3. P. H287–H296.
145. Sato N., Aoyama Y., Yamanaka J., Toyotama A., Okuzono T. Particle adsorption on hydrogel surfaces in aqueous media due to van der Waals attraction. *Scientific Reports.* 2017. Vol. 7, no. 6099. P. 1–10.
146. Valmacco V., Elzbieciak-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.
147. Рехвиашвили С.Ш. Применение дробного интегрирования для расчета термодинамических свойств поверхностей. *Физика твердого тела.* 2007. Т. 49. вып. 4. С. 756–759.
148. Krajina B.A., Kocherlakota L.S., Overney R.M. Direct determination of the local Hamaker constant of inorganic surfaces based on scanning force microscopy. *J. Chem. Phys.* 2014. Vol. 141. P. 164707.
149. Bergstrom L., Meurk A., Arwin H., Rowcliffe D.J. Estimation of Hamaker constants of ceramic materials from optical data using Lifshitz theory. *J. Am. Ceram. Soc.* 2005. Vol. 79, no. 2. P. 339–348.
150. Yao J., Han H., Hou Y., Gong E., Yin W. A method of calculating the interaction energy between particles in minerals flotation. *Math. Probl. Eng.* 2016. Vol. 2016, art. 8430745.
151. Teh E.-J., Leong Y.K., Liu Y., Ong B.C., Berndt C.C., Chen S.B. Yield stress and zeta potential of washed and highly spherical oxide dispersions – Critical zeta potential and Hamaker constant. *Powder Technol.* 2010. Vol. 198, no. 1. P. 114–119.

152. Faure B., Salazar-Alvarez G., Bergström L. Hamaker constants of iron oxide nanoparticles. *Langmuir*. 2011. Vol. 27, no. 14. P. 8659–8664.
153. 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. Aspects*. 2015. Vol. 482. P. 656–661.
154. Филатов Ю.Д., Горбачев Г.Ф., Сидорко В.И., Крамар В.Г., Скрябин В.В. Закономерности неравновесного процесса полирования алюмосиликатных материалов. *Сверхтв. материалы*. 2001. № 2. С. 26–32.
155. Filatov Yu., Sidorko V. Formation of flat optical surfaces in polishing. *Jemna mehanika a optika*. 2009. Vol. 9. P. 239–243.
156. Бахолдин С.И., Маслов В.Н. Моделирование поверхностных энергий кристаллов сапфира. *Физика твердого тела*. 2015. Т. 57, вып. 6. С. 1213–1219.
157. Filatov Yu. D. Interaction between debris particles and polishing powder wear particles in polishing optoelectronic components. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, iss. 4. P. 282–289.
158. Филатов Ю.Д., Рогов В.В. Особенности процесса полирования стекла инструментом со связанным полировальным порошком. *Оптика и спектроскопия*. 1993. Т. 74, вып. 6. С. 1229–1235.
159. Zhang Z., Yu L., Liu W., Song Z. Surface modification of ceria nanoparticles and their chemical mechanical polishing behavior on glass substrate. *Appl. Surface Sci.* 2010. Vol. 256. P. 3856–3861.
160. Shi X., Pan G., Zhou Y., Liu Y. Realization of atomic-level smooth surface of sapphire (0001) by chemical-mechanical planarization with nano colloidal silica abrasives. *Int. Conf. Planariz., CMP Technology (ICPT 2014)*. Kobe, Japan, 19–21 Nov., 2014. P. 250–253.
161. Zhang Z., Liu W., Song Z., Hu X. Two-step chemical mechanical polishing of sapphire substrate. *JECs*. 2010. Vol. 157, no. 6. H688–H691.
162. Ozbek S., Akbar W., Basim G.B. Optimized process and tool design for gan chemical mechanical planarization. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2017. Vol. 6, no. 11. P. S3084–S3092.
163. Liang S., Jiao X., Tan X., Zhu J. Effect of solvent film and zeta potential on interfacial interactions during optical glass polishing. *Appl. Opt.* 2018. Vol. 57, no. 20. P. 5657–5665.
164. Chen G., Ni Z., Bai Y., Li Q., Zhao Y. The role of interactions between abrasive particles and the substrate surface in chemical-mechanical planarization of Si-face 6H–SiC. *RSC Adv.* 2017. Vol. 7. P. 16938–16952.
165. Zhang K., Song Z., Lin C., Feng S., Chen B. Colloidal nano-abrasives and slurry for chemical-mechanical polishing of semiconductor materials. *J. Ceramic Proc. Res.* 2007. Vol. 8, no. 1. P. 52–55.
166. Filatov Yu.D., Filatov O.Y., Heisel U., Storchak M.G., Monteil G. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method. *Proc. SPIE. Optical Micro- and Nanometrol.* 2010. Vol. 7718. P. 77181J–7718 1J–9.
167. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Filatov A.Yu., Yashuk V.P., Heisel W., Storchak M. Surface quality control in diamond abrasive finishing. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI. Proc. SPIE.* 2009. Vol. 7389. P. 73892O–73892O.
168. Filatov Yu.D., Sidorko V.I., Filatov O.Yu., Kovalev S.V., Heisel U., Storchak M. Surface roughness in diamond abrasive finishing. *J. Superhard Mater.* 2009. Vol. 31, iss. 3. P. 191–195.
169. Filatov Yu.D., Yashchuk V.P., Filatov A.Yu., Heisel U., Storchak M., Monteil G. Assessment of surface roughness and reflectance of nonmetallic products upon diamond abrasive finishing. *J. Superhard Mater.* 2009. Vol. 31, iss. 5. P. 338–346.
170. Filatov Yu.D., Filatov A.Yu., Syrota O.O., Yashchuk V.P., Monteil G., Heisel U., Storchak M. The influence of tool wear particles scattering in the contact zone on the workpiece surface microprofile formation in polishing quartz. *J. Superhard Mater.* 2010. Vol. 32, iss. 6. P. 415–422.
171. Волошин А.Э., Рашкович Л.Н., Руднева Е.Б., Маноменова В.Л. Выращиваем кристаллы. *Природа*. 2014. № 10. С. 62–72.
172. Butashin A.V., Vlasov V.P., Kanevskii V.M., Muslimov A.E., Fedorov V.A. Specific features of the formation of terrace-step nanostructures on the (0001) surface of sapphire crystals. *Crystallography Reports*. 2012. Vol. 57, no. 6. P. 824–830.
173. Shi X., Xu L., Zhou Y., Zou C., Wang R., Pan G. An in situ study of chemical-mechanical polishing behaviours on sapphire (0001) via simulating chemical products-removing process

- by AFM-tapping mode under both liquid and air environments. *Nanoscale*. 2018. Vol. 10. P. 19692–19700.
174. Zhou Y., Pan G., Sh, X., Zou C., Gong H., Xu L., Luo G. The effects of ultra-smooth surface atomic step morphology on CMP performances of sapphire and SiC wafers. *Proc. Int. Conf. on Planarization/CMP Technology. Kobe, Japan*, 2014. P. 246–249.
175. Bentz D.N., Betush W.J., Jackson K.A. Kinetic Monte Carlo simulations of the surface roughening of binary systems. *J. Crystal Growth*. 2003. Vol. 250. P. 162–165.
176. Zhang L., Wang J., Zhang J. Super-smooth surface fabrication technique and experimental research. *Appl. Optics*. 2012. Vol. 51, no. 27/20. P. 6612–6617.
177. Wang J.L. Ultrasmooth polishing with sub-angstrom roughness on fused silica surface. *Appl. Mechan. Mater.* 2014. Vol. 651–653. P. 150–156.
178. Kong J. Young K. Ultra-smooth finishing of aspheric surfaces using CAST technology. *Adv. Opt. Techn.* 2014. Vol. 3, no. 3. P. 279–291.
179. He T., Wei C., Jiang Z., Zhao Y., Shao J. Super-smooth surface demonstration and the physical mechanism of CO₂ laser polishing of fused silica. *Optics Letters*. 2018. Vol. 43, iss. 23. P. 5777–5780.
180. Liao W., Nie X., Liu Z., Nie X., Wan W. Researches on formation mechanism of ultra-smooth surface during ion beam sputtering of fused silica. *Optik*. 2019. Vol. 179. P. 957–964.

Поступила в редакцию 25.04.2019

После доработки 24.07.2019

Принята к публикации 25.07.2019