

В.С. Антонюк, д.т.н., проф.
Національний технічний університет України «КПІ»
Ю.І. Коваленко, ст. викл.
Ю.Ю. Бондаренко, к.т.н., доц.
М.О. Бондаренко, к.т.н., доц.
Черкаський державний технологічний університет

ПІДВИЩЕННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ЕЛЕМЕНТІВ ВИРОБІВ З ОПТИЧНОГО СКЛА МІКРООБРОБКОЮ ЕЛЕКТРОННИМ ПОТОКОМ У ВАКУУМІ

Показана можливість низькоенергетичної електронно-променевої мікрообробки поверхонь оптичного скла К8, що призводить до покращання їх техніко-експлуатаційних характеристик (мікротвердості та зносостійкості). Запропоновані оптимальні режими електронно-променевої мікрообробки: титома потужність електронного потоку $P_{\text{титома}} = 3,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$; струм електронного потоку $I_f = 36 \text{ мА}$; час електронної дії $t = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Встановлене збільшення мікротвердості оптичних поверхонь, оброблених запропонованим методом низькоенергетичної електронно-променевої мікрообробки, у 2,5...3,5 рази, а зносостійкості – у 1,23...1,27 рази.

Ключові слова: оптичне скло; електронно-променева мікрообробка; мікротвердість; зносостійкість; атомно-силова мікроскопія.

Вступ. Постановка проблеми. Використання нових технологій у таких галузях, як мікрооптика, оптоелектроніка, фотоніка тощо набуває подальшого розвитку. Під час виготовлення елементів мікрооптичних пристроїв і систем основний акцент робиться на підвищенні точності та експлуатаційної спроможності таких виробів при зменшенні їх габаритів до мікро- та нанометричних розмірів [1].

Така мініатюризація вимагає дотримання особливих вимог до показників якості поверхонь матеріалів елементів, з яких виготовлені ці вироби [2]. Широке розповсюдження серед різноманіття оптичних матеріалів має оптичне скло через високу оптичну прозорість і піддатливість до хіміко-механічного та теплового модифікування поверхні.

Проте використання оптичного скла як матеріалу виробів мікрооптики, що використовуються в екстремальних та/або агресивних умовах навколишнього середовища (підвищених тисків, температур, умовах високої вологості, радіоактивності тощо) як вимірювально-інформаційні елементи пристроїв та систем, обмежується високою крихкістю, зношуваністю, а також малою твердістю та стійкістю до зовнішніх впливів. Це, в свою чергу, призводить до руйнування поверхневого шару оптичних елементів і, як наслідок, значне зниження техніко-експлуатаційних характеристик виробів у цілому. Виходом із даної ситуації є модифікування оптичних матеріалів з метою підвищення мікротвердості та зносостійкості їх поверхонь.

Серед існуючих методів модифікування виробів із оптичного скла перспективним є метод стрічкової електронно-променевої мікрообробки (ЕПМО) [3], що належить до високотемпературних (робоча температура в зоні обробки становить 1500...1600 К) і швидкодіючих (час термічного впливу на матеріал не перевищує одиниць секунд), у результаті застосування якого утворюється поверхня з новими фізико-хімічними та експлуатаційними властивостями [4].

Сутність методу полягає в спрямованій дії електронного потоку на поверхню оптичного матеріалу. Значна частина кінетичної енергії електронів, що проникають у поверхневий шар оптичного матеріалу товщиною $10^{-9} \dots 10^{-8} \text{ м}$ переходить у теплову. Далі нагрів матеріалу здійснюється за відомими фізичними законами теплопровідності і тепломасоперенесення (процеси розповсюдження тепла залежать від інтенсивності теплової дії, теплофізичних властивостей матеріалу, часу впливу на матеріал тощо).

Так для ефективного розплавлення тонкого поверхневого шару, час електронної обробки матеріалів має перевищувати час проникнення теплового потоку в глибину матеріалу. За таким механізмом реалізовані окремі способи поверхневої термічної обробки оптичного скла низькоенергетичним ($E \leq 6 \text{ кеВ}$) електронним потоком стрічкової форми [5].

Найбільш перспективним методом у вирішенні цього питання є модифікування поверхонь оптичного скла низькоенергетичним електронним потоком стрічкової форми у вакуумі й подальше дослідження мікротвердості та зносостійкості отримуваних поверхонь. Проте основною проблемою під час використання методу ЕПМО є правильний вибір робочої схеми та режимів модифікування поверхонь оптичного скла.

Тому актуальним постає питання аналізу та подальшого вибору робочих параметрів процесу електронно-променевої мікрообробки для підвищення мікротвердості та зносостійкості поверхонь виробів мікрооптики з оптичного скла.

Метою роботи є підвищення мікротвердості та зносостійкості поверхонь виробів мікрооптики з оптичного скла мікрообробкою електронним потоком у вакуумі.

Очікуваним технічним результатом від модифікування поверхонь електронно-променевим методом є підвищення їх мікротвердості та зносостійкості. Для цього пропонується обробляти покриття стрічковим низькоенергетичним ($E \leq 6$ keV) електронним потоком, за рахунок стабілізації теплових умов попереднього нагріву виробів, роботи електронно-променевої гармати та охолодження виробів після електронно-променевої мікрообробки.

Як експериментальні використовували зразки з оптичного скла К8 (диски діаметром 20 мм, товщиною 2 мм, загальна кількість – 10 штук).

Експериментальні дослідження проводили на модифікованій електронно-променевій установці (ЕПУ), що виготовлена на базі стандартної промислової вакуумної установки УВН-71.

До модифікованої ЕПУ та технологічного оснащення висувалися такі вимоги:

1. Забезпечення повного термічного та технологічного циклу ЕПМО; можливість контролю та керування параметрами електронного потоку при обробці оптичних виробів круглої форми, виготовлених із оптичного скла К8.

При цьому:

- рухомі частини установки мають синхронно і у певній послідовності виконувати операції технологічного процесу в автоматичному чи напівавтоматичному режимах з високою точністю ($R_a \leq 5$ нм) та надійністю безперервної експлуатації виробів (за умов згідно з ОСТЗ-69-77 – до 20 років);

- технологічне оснащення та обрані режими електронного потоку мають забезпечувати якісну обробку (мікронерівності поверхні не більше 5 нм; точність поверхні – 0...1 кільця Ньютона; залишкові термонапруження 3,2...3,6 МПа; хімічна однорідність поверхні 0–1 класу) з високою повторюваністю (25...30 %) за тривалий період експлуатації дрютяного вольфрамового катода електронної гармати Пірса (до 120 годин).

2. Дотримання гарантованих екологічної чистоти та безпечних умов праці обслуговуючого персоналу.

Основним елементом ЕПУ є електронна гармата Пірса, що генерує електронний потік стрічкової форми і містить: дрютяний вольфрамовий катод марки ВА-1-ТО (діаметр 0,3...0,8 мм, довжина 90 мм), анод (ширина щілини 0,3...3,5 мм), прискорюючий електрод – модулятор (довжина 70 мм).

У конструкції електронної гармати Пірса застосовано катодний вузол, що гарантує натягнення дроту катода (зусилля натягнення 15...30 Н) паралельно площинам модулятора (відхилення від паралельності не більше $0,1^\circ$) при робочих температурах до 2800 К.

Для рівномірного переміщення виробів під електронним потоком розроблено механізм механічного переміщення з мікропроцесорною системою керування.

Виконавчим органом механізму переміщення слугує ходовий гвинт, за допомогою якого отримуємо точність переміщення оптичних виробів 0,5 мм/крок. Підкладинка слугує для базування та кріплення оптичних виробів.

Основні вимоги до механізму переміщення:

– максимальні вібрації оптичних виробів у процесі руху не більше 5 Гц/мм за їх амплітуди не більше 0,1 мм;

– можливість плавного регулювання швидкості переміщення підкладинки з виробами в діапазоні робочих швидкостей $(1,5...10) \cdot 10^2$ м/с;

– можливість безінерційного розгону та гальмування механізму переміщення з прискоренням ± 2 см/с².

Для дотримання температури поверхні оптичного виробу на заданому рівні, згідно з профілем термічної карти технологічного процесу, використовуються системи програмного контролю та керування.

Пристрій мікропроцесорного керування механізмом переміщення оптичних виробів слугує для переміщення оптичних виробів у робочому просторі в діапазоні швидкостей $(1,5...10) \cdot 10^2$ м/с згідно з попередньо прийнятим законом переміщення (задається програмою мікроконтролера).

Пристрій складається з двох основних частин: силової та цифрової.

Призначення силової частини – формування напруги живлення системи: постійної напруги обмотки збудження електродвигуна (96 В), напруги обмотки якоря електродвигуна (до 60 В), напруги живлення реле реверса (20 В), напруги живлення цифрових мікросхем (5 В).

Цифрова частина виконує наступні функції: читання клавіатури, вивід інформації на індикатор, формування сигналу керування електродвигуном, читання та обробка даних з датчика руху, керування реле реверса.

Порядок проведення експерименту. Коли експериментальні зразки оптичних виробів завантажені у вакуумну камеру, в останній створюється робочий вакуум порядку $10^{-2} \dots 10^{-4}$ Па. Після цього зразки поміщаються в зону печі попереднього розігріву, де розігріваються до температури 570...620 К, що усуває можливість виникнення термонапружень в оброблювальних зразках. Більші температури не припустимі через можливість початку розм'якшення скла, що призводить до деформації зразків.

Нагрівачі розташовані в печах попереднього розігріву і охолодження таким чином, щоб забезпечити рівномірний та однаковий за температурою нагрів оптичних зразків. Переміщуючись після попереднього нагріву за допомогою блока транспортування, вироби виходять з печі і потрапляють у зону дії електронного потоку електронної гармати Пірса.

Інтенсивність електронного потоку і швидкість переміщення виробів під ним забезпечують необхідні умови його термічної дії на матеріал (оплавлення поверхневого шару нанесеного покриття). Пройшовши термічну мікрообробку електронним променем, вироби потрапляють у піч охолодження, де знаходяться протягом певного часу. Температура в печах регулюється електронними термодатчиками приладу РИФ-101.

Оптимізацію режимів електронно-променевої дії на оптичні матеріали проводили з використанням методу планування багатофакторного експерименту.

В основі методики оптимізації режимів з використанням методу планування багатофакторного експерименту лежить припущення про те, що вплив чинників на поверхню відгуку в загальному випадку можна аналітично записати у вигляді:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i),$$

де Y – відгук процесу; X_1, X_2, \dots, X_i – відомі параметри, що можна змінювати під час експерименту.

Вхідні параметри експерименту:

- сила струму обробки, $I_f(X_1) = 15 \dots 50$ мА;
- питома потужність, $P_{nm}(X_2) = 2,5 \dots 5$ кВт/м²;
- час електронної модифікації поверхні, $t(X_3) = 1 \dots 10$ мкс.

Вихідним параметром вибрано значення мікротвердості, що варіювалися в межах $Hv(Y) = 35 \dots 735$ кгс/мм².

У процесі вимірювали значення Y та X експерименту, проте вид їх функції зв'язку не відомий.

При цьому приймалось, що на величину Y впливають не лише значення X_1, X_2, X_i , а також низка некерованих чинників, до яких належать похибки вимірювань, неконтрольовані зміни довкілля тощо.

Провівши регресійний аналіз, визначили значення коефіцієнтів регресії.

Для функції Y визначили нелінійний поліном:

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2^2 + B_3 X_3^3.$$

Склавши матрицю X і транспоновану матрицю (шляхом заміни місць стовпців і рядків), знаходимо матрицю X^T , складаючи почленно елементи рядків X^T і стовпців X .

Для обчислення зворотної матриці $(X^T X)^{-1}$ знаходимо визначник матриці $X^T X$ (Δ).

Матрицю $(X^T X)^{-1}$ складаємо з визначника Δ і доповнень матриці $X^T X$.

Далі записуємо матрицю Y і знаходимо добуток $X^T Y$.

І, нарешті, отримаємо:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y = \begin{pmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{pmatrix}.$$

Таким чином, підставляючи чисельні значення коефіцієнтів, отримали: $B_0 = 0,13$; $B_1 = -0,81$; $B_2 = 0,35$; $B_3 = -0,016$

Тоді рівняння регресії має вигляд:

$$Y = 0,13 - 0,81 X_1 + 0,35 X_2^2 - 0,016 X_3^3.$$

Таким чином визначили оптимальні режими модифікування оптичних матеріалів електронно-променевою мікрообробкою на модифікованій електронно-променевої установці:

- питома потужність $P_{nm} = 3,5 \cdot 10^3$ Вт/м²;
- струм електронного потоку $I_f = 36$ мА,
- час електронної дії $t = 1,2 \cdot 10^{-6}$ с.

Дослідження мікротвердості зразків із оптичного скла К8 проводили методом мікротвердометрії за Вікерсом з використанням алмазної пірамідки на приладі DuroScan-10/20.

Дослідження зносостійкості визначали методом склерометрії на приладі NT-206 за методикою, описаною в [6].

Обговорення результатів експерименту. Після модифікування поверхонь зразків стрічковим низькоенергетичним електронним потоком, їх поверхня обов'язково перевірялася [7, 8]:

- за мікротвердістю поверхні зразків (дослідження проводилося в трьох точках на поверхні кожного зразка) (рис. 1);

- на зносостійкість поверхні зразка методом склерометрії (рис. 2).

Мікротвердість зразків вимірювали на оптичному мікротвердомірі Duro-Scan-10/20 (Центр колективного користування «Мелітек-Україна», м. Київ) (табл. 1).

Таблиця 1

Результати дослідження і порівняння мікротвердості зразків зі скла К8 при навантаженні 25 г

Досліджуваний зразок	Мікротвердість H (кгс/мм ²)	
	до ЕПМО	після ЕПМО
Зразок 1	495	495
Зразок 2	495	497
Зразок 3	498	506
Зразок 4	498	1045
Зразок 5	503	1056
Зразок 6	497	944
Зразок 7	496	1140
Зразок 8	495	1485
Зразок 9	499	1247
Зразок 10	497	1740

На рисунку 1 показано зовнішній вигляд ділянки поверхні оптичного скла К8 з відбитком алмазного наноіндентора, отриманого методом мікротвердометрії за Вікерсом на приладі Duro-Scan-10/20 до (рис. 1, а) та після (рис. 1, б) електронно-променевої мікрообробки. Як видно, мікротвердість поверхні оптичного скла (рис. 1, а), що підлягала дії алмазного індентора, може бути визначена при навантаженні на індентор, яке не перевищувало 25 г; при цьому, навіть при такому навантаженні спостерігається тріщиноутворення по кутах відбитку алмазної пірамідки.

Це пов'язано з утворенням стискаючих напружень у приповерхневому шарі зразка.

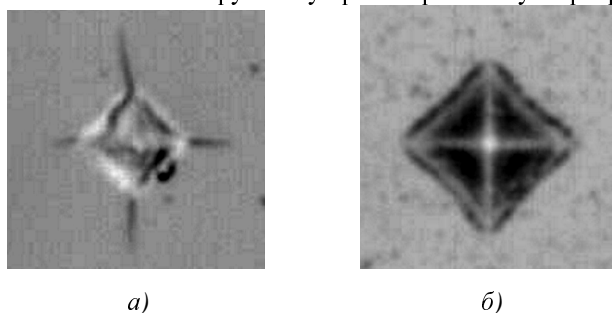


Рис. 1. Вигляд ділянки поверхні оптичного скла К8 до (а) та після (б) електронно-променевої мікрообробки з відбитком алмазного наноіндентора

Разом з тим, дія алмазного індентора на поверхню оптичного скла, обробленого низькоенергетичним електронним потоком (рис. 1, б), при тому самому навантаженні (25 г) дозволяє отримати чіткий та якісний відбиток. Це зменшує похибку визначення мікротвердості і візуально підтверджує гіпотезу про збільшення мікротвердості оптичної поверхні після її поверхневої електронно-променевої мікрообробки за рахунок зменшення стискаючих термонапружень після термічного відпалювання зразків після ЕПМО.

Аналіз отриманих результатів визначення мікротвердості дозволив встановити, що перші три зразки з партії після ЕПМО за режимами, які відповідають мінімальним значенням параметрів електронної мікрообробки, мають мікротвердість, що відповідає значенням мікротвердості зразків до ЕПМО.

У той самий час, зразки 4–7, що були оброблені за режимами, які відповідають максимальним значенням параметрів електронної мікрообробки, мають мікротвердість у 1,9...2,3 раза більшу, ніж до ЕПМО. При цьому, використання оптимальних режимів обробки, за якими проводилася обробка зразків 8–10, дозволяє збільшити мікротвердість у 2,5...3,5 раза.

Таке збільшення мікротвердості, на думку авторів, пов'язане з хімічними та структурними змінами в поверхневому шарі скла [9], що призводить до його окварцювання.

Зносостійкість зондів випробували за методом склерометрії. При цьому випробування проводили на приладі NT-206 при навантаженні на зонд $5 \cdot 10^{-4}$ Н.

Зображення результатів склерометрії оптичного скла К8, отриманого за методом атомно-силової мікроскопії, наведено на рисунку 2.

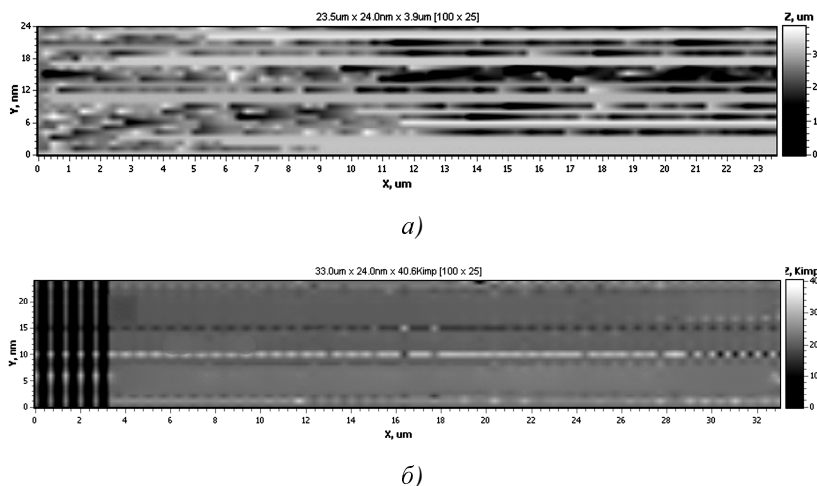


Рис. 2. Результат склерометрії на поверхні оптичного скла К8 до (а) та після (б) електронно-променевої мікрообробки

Як видно з рисунка 2, інтенсивність та розподіл навалів матеріалу (горизонтальні смуги вздовж треку дряпання (осі X) відповідають однорідності навалів, а вертикальний розподіл вздовж осі Y – інтенсивності розподілу цих навалів), що були отримані при дряпанні зондом атомно-силового мікроскопу, є більш нерівномірними та переривчастими для вихідної поверхні оптичного скла, тоді як для поверхні зразка після ЕПМО розподіл цих навалів більш однорідний та рівномірний за інтенсивністю.

Цей факт може бути інтерпретований наступним чином. Горизонтальні треки дряпання є результатом реакції матеріалу зразка на дію зонда, що дряпає його. Так висока крихкість матеріалу (що фактично відповідає низькій його зносостійкості) при дряпанні поверхні створює високу неоднорідність треків дряпання (поверхня матеріалу вздовж руху зонда розтріскується та руйнується), тоді як дія зонда на більш твердий матеріал, немовби «проминає» його поверхню, утворюючи більш рівномірний розподіл навалів вздовж цих треків.

За результатами дослідження встановлено, що коефіцієнт зносостійкості поверхні оптичного скла, обробленого електронним потоком (рис. 2, б), складає 23,1...25,6 (для порівняння: критерій зносостійкості алмазу $k = 100$), тоді як для поверхонь оптичного скла, необробленого електронним потоком (рис. 2, а), цей коефіцієнт становить 18,7...20,1. Це призводить до більш швидкого зношення поверхні оптичного скла без її модифікування.

Висновки. Ефективність низькоенергетичної мікрообробки оптичного скла методом стрічкової електронно-променевої мікрообробки поверхонь показана на прикладі скла марки «крони» К8, внаслідок чого відбувається зміцнення поверхневого шару скла шляхом його окварцювання, що, в свою чергу, призводить до підвищення його мікротвердості та зносостійкості поверхневого шару.

Розроблено технологію стрічкової електронно-променевої мікрообробки та визначені оптимальні режими низькоенергетичної мікрообробки поверхонь виробів із оптичного скла К8 електронним потоком стрічкової форми.

Показано, що використання оптимальних режимів електронно-променевої низькоенергетичної мікрообробки оптичного скла К8 призводить до збільшення мікротвердості оптичних поверхонь у 2,5...3,5 рази, а їх зносостійкості – у 1,23...1,27 рази.

Список використаної літератури:

1. *Канашиевич Г.В.* Доцільність впровадження мікрооптичного виробництва в Україні / *Г.В. Канашиевич, М.О. Бондаренко, А.К.М. Ружон* // Матер. VI Міжнар. науково-практ. конф. «Теорія і практика сучасної економіки». – Черкаси: ЧДТУ, 2005. – С. 234–237.
2. Исследование процесса формообразования стеклянных шариков для микрооптики по высокоэффективной технологии / *А.А. Сухоцкий* и др. // Оптический журнал. – 2002. – Т. 69, № 6.
3. *Канашиевич Г.В.* Термічна електронно-променева обробка скляних плат оптичних інтегральних схем / *Г.В. Канашиевич* // Деп. в НИИ ТЭХИМ. – Черкасы, 2002. – 168 с.
4. *Канашиевич Г.В.* Спеціальні методи обробки оптичного скла / *Г.В. Канашиевич, Д.І. Котельніков, В.А. Ващенко*; за ред. проф. *Д.І. Котельнікова*. – Чернівці: Сіверська думка, 2002. – 215 с.
5. *Канашиевич Г.В.* Перспективи використання електронного променя в технологіях інтегральної оптики / *Г.В. Канашиевич, В.А. Ващенко, М.О. Бондаренко* // Вісник Черкаського держ. технол. ін-ту. – 2000. – № 2. – С. 189–193.
6. Исследование металлизированных поверхностей модифицированных ленточным электронным потоком / *Ю.И. Коваленко* и др. // Вісник НТУУ «КПІ». – 2012. – № 64. – 4 с.
7. *Antonyuk V.S.* Studies of thin wear-resistant carbon coatings and structures formed by thermal evaporation in a vacuum on piezoceramic materials / *V.S. Antonyuk, M.O. Bondarenko, Yu.Yu. Bondarenko* // Journal of superhard materials. – 2012. – Vol. 34, № 4. – Pp. 248–255.
8. *Бондаренко М.О.* Дослідження тонких зносостійких вуглецевих покриттів і структур сформованих термічним випаровуванням у вакуумі на п'єзокерамічних матеріалах / *М.О. Бондаренко, В.С. Антонюк, Ю.Ю. Бондаренко* // Сверхтвердые материалы. – 2012. – Вып. 4. – С. 45–55.
9. *Канашиевич Г.В.* Структурні перетворення у поверхневому шарі оптичного скла та фотопластинах від дії низькоенергетичного електронного потоку / *Г.В. Канашиевич, Г.М. Дубровська, М.О. Бондаренко* // Матер. научно-техн. конф. (2–4 черв. 2004 р., м. Одеса). – С. 60–64.

АНТОНЮК Віктор Степанович – доктор технічних наук, професор кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- інженерія поверхні;
 - атомно-силова мікроскопія.
- E-mail: vp@kpi.ua.

КОВАЛЕНКО Юрій Іванович – старший викладач кафедри фізики Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- інженерія поверхні;
 - електронно-променева обробка діелектричних матеріалів.
- E-mail: kovyurij@rambler.ru.

БОНДАРЕНКО Юлія Юріївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих та інформаційних технологій в приладобудуванні Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- інженерія поверхні;
 - атомно-силова мікроскопія.
- E-mail: julybo@rambler.ru.

БОНДАРЕНКО Максим Олексійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- інженерія поверхні;
- електронно-променева обробка діелектричних матеріалів;
- атомно-силова мікроскопія.

Стаття надійшла до редакції 14.05.2015