

УДК 621.793.14

В. С. Антонюк* (м. Київ)

С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко,**

Ю. І. Коваленко (м. Черкаси)

*vp@kpi.ua

**maXXium@rambler.ru

Формування зносостійких покриттів на кремнієвих зондах для атомно-силової мікроскопії термовакuumним випаровуванням

Показано можливість модифікування кремнієвих зондів атомно-силового мікроскопу тонким зносостійким вуглецевим покриттям, що приводить до покращення їхніх експлуатаційних властивостей (зменшує імовірність виникнення артефактів сканування на 20–22 %, збільшує термін експлуатації на 45–55 %). Запропоновано оптимальні режими нанесення таких покриттів термічним випаровуванням у вакуумі з подальшою низькоенергетичною електронно-променевою їх мікрообробкою. Проведено перевірку якості нанесеного покриття, яка встановила зменшення субшорсткості поверхні зонда у 15–25 разів, а також збільшення мікротвердості та зносостійкості цих покриттів у 1,1–1,35 разів.

Ключові слова: кремнієвий зонд, атомно-силова мікроскопія, тонке покриття, електронно-променева мікрообробка, зносостійкість.

ВСТУП

На сьогодні напрям науки “нанотехнологія” набуває все більш стрімких темпів розвитку. Під терміном “нанотехнології” мають на увазі компоненти або системи, які хоча б в одному з просторових напрямків мають розміри, що лежать в діапазоні від 1 до 100 нм [1]. Рядом вчених було помічено, що зі зміною розмірів системи до нанометричних можуть суттєво змінюватись її властивості. Наприклад, при зміні розмірів частинок напівпровідника до нанорозмірних в тонких плівках починають проявлятися властивості, відмінні від тих, що властиві об’ємним макрооб’єктам (зокрема квантові ефекти). При взаємодії квантової точки з електромагнітним випромінюванням виникає ексітон, захоплений у потенціальну яму. Рекомбінація ексітону приводить до вивільнення енергії, завдяки чому частинки нанометричних розмірів, що утворені з таких напівпровідникових речовин, як селенід кадмію (CdSe), здатні поглинати та флуоресцювати. При цьому колір флуоресценції залежить від діаметру квантових точок [2]. Так, наприклад, зміна розміру ядра CdSe від 13 до 24 нм приводить до зміни флуоресценції від блакитного ($\lambda = 500$ нм) до червоного ($\lambda = 610$ нм).

Дослідження нанорозмірних об’єктів, що знаходять широке застосування в мікрооптиці та наноелектроніці, неможливі без сучасних методів і засобів дослідження. Серед фахівців у галузі досліджень мікрорельєфу та механічних властивостей поверхонь матеріалів найбільшою популярністю користуються електронна мікроскопія (ЕМ), профілометрія та атомно-силова мікроскопія

© В. С. АНТОНЮК, С. О. БІЛОКІНЬ, М. О. БОНДАРЕНКО, Ю. Ю. БОНДАРЕНКО, Ю. І. КОВАЛЕНКО, 2015

(АСМ). Метод АСМ, окрім високої роздільної здатності (в горизонтальній площині – ~ 1 нм, у вертикальній площині – 0,2–0,5 нм), дає можливість отримати трьохвимірне відображення рельєфу поверхні, а також визначити її механічні характеристики (мікротвердість, модуль пружності тощо), ступінь гідрофобності матеріалу, термічні та електричні характеристики. Така універсальність методу відкриває широку перспективу при дослідженні властивостей нових матеріалів.

Принцип дії атомно-силового мікроскопу полягає у контактному або безконтактному скануванні досліджуваної поверхні вимірювальним датчиком, яким є зонд – голка нанометричних розмірів, що закріплена на вільному кінці довгої тонкої консолі. Відхилення консолі викликає різницю потенціалів на вимірювальному п'єзочіпі, інформація з якого дає значення реальної мікрогеометрії поверхні. Ще однією перевагою методу є можливість вимірювання фізико-механічних, теплових, електричних та магнітних властивостей поверхонь різноманітних матеріалів. При цьому модуль навантаження зонда працює як звичайний мікротвердомір, а глибина проникнення індентора (зонда) досягає сотень нанометрів. Це дає змогу досліджувати матеріали з осадженими на них нанометричними плівками, їхню адгезію до поверхні. Як було описано в [3], актуальною і перспективною також є методика сканування з подальшим індентуванням в одному циклі сканування.

Проте основною проблемою при використанні методу є правильний вибір зондів для проведення конкретних видів досліджень. Так, для сканування зразка використовують кремнієвий зонд, а для наноіндентування – алмазний. Для сканування та індентування в одному циклі не підходить жоден з них, оскільки кремнієвий зонд занадто крихкий для проведення наноіндентування, а застосування алмазного зонду для сканування діелектричних матеріалів не раціонально у зв'язку з його дорожнечою та високою твердістю, що призводить до руйнування м'яких зразків, внаслідок чого відбувається спотворення результатів сканування.

При цьому застосування алмазного індентора Берковича дозволяє як сканувати поверхню зразка, так і проводити його наноіндентування в комплексному дослідженні мікрогеометрії та, наприклад, мікротвердості поверхні матеріалів. Але використання такого зонду унеможлиблюється крайньою складністю та високою імовірністю появи артефактів сканування при дослідженнях механічних властивостей тонких поверхневих шарів матеріалів (глибиною залягання до 0,2 мкм) [4].

Найбільш перспективним підходом у вирішенні цього питання є модифікація вуглецевим функціональним покриттям поверхонь конічних кремнієвих зондів для подальшого проведення за їхньою допомогою досліджень твердих матеріалів в контактному режимі. Ефективним методом для отримання таких покриттів може стати метод термічного випаровування у вакуумі.

Тому актуальними є отримання ультратонких (< 10 нм) зносостійких вуглецевих покриттів на зондах АСМ термічним осадженням у вакуумі, а також вивчення їхніх експлуатаційних властивостей при комбінованому дослідженні мікрогеометрії та механічних властивостей поверхонь діелектриків в одному циклі сканування.

Метою роботи є підвищення зносостійкості кремнієвих зондів для атомно-силової мікроскопії при формуванні на їхній поверхні термічним випаровуванням у вакуумі тонких вуглецевих покриттів та дослідження їхніх експлуатаційних властивостей.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Очікуваним технічним результатом від модифікації поверхонь кремнієвих зондів вуглецевим покриттям є підвищення якості (зменшення субшорсткості, поруватості) та терміну надійної експлуатації їхніх поверхонь (підвищення їхніх мікротвердості та зносостійкості). Для цього обробляли отримані покриття стрічковим низькоенергетичним ($E \leq 6$ кеВ) електронним потоком при попереднього нагріві виробів для стабілізації теплових умов та охолодженні виробів після електронно-променевої мікрообробки.

Як зразки-свідки використовували підкладинки (диски діаметром 35 мм, товщиною 0,1 мм) із кремнію марки Кр0 (ПАТ “Укрп’езо”, м. Черкаси). Зразками для осадження були зонди марки CSC38 (Micromash, Німеччина).

Технологічні дослідження проводили на електронно-променевої установці, яка виготовлена на базі стандартної промислової вакуумної установки УВН-71.

Модифікування поверхні кремнієвих зондів базувалося на існуючій методиці [5], його послідовність наведена на рис. 1.



Рис. 1. Послідовність модифікування зондів тонким покриттям.

Підготовка зразків кремнієвих зондів

Кремнієві зонди марки CSC38 закріплювали у тримачі (рис. 2), який попередньо очищували 15 %-ним розчином ізопропілового спирту, після чого над зондом розташовували маску. Очищення самого зонду необхідно проводити іонним очищенням безпосередньо у вакуумній камері за наступних умов: робочий вакуум процесу очищення – 0,1–10 Па, напруга на іонізаторі – 2–2,5 кВ, струм іонізатора – менше 10 мкА.

Чутливий елемент АСМ кладеться на столик і затискається жорсткою пластиною, після чого столик жорстко закріплюється в корпусі за допомогою шпильки. Над зондом в пази корпусу встановлюється маска, в якій зроблено отвір шириною 1–1,5 мм під кутом 45°. Маска переміщується в корпусі тримача і встановлюється таким чином, щоб отвір був розміщений над зондом.

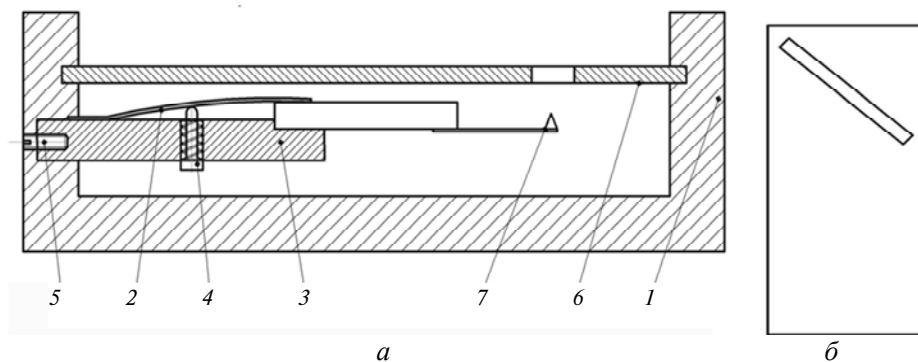


Рис. 2. Схематичне зображення тримача для зондів (а): 1 – корпус тримача; 2 – жорстка пластина; 3 – столик; 4 – кнопка відхилення жорсткої пластини; 5 – шпилька; 6 – маска, вид згори (б); 7 – чутливий елемент АСМ.

Підготовка технологічного обладнання

Узагальнена схема пристрою для прецизійної обробки зразків-свідків представлена на рис. 3.

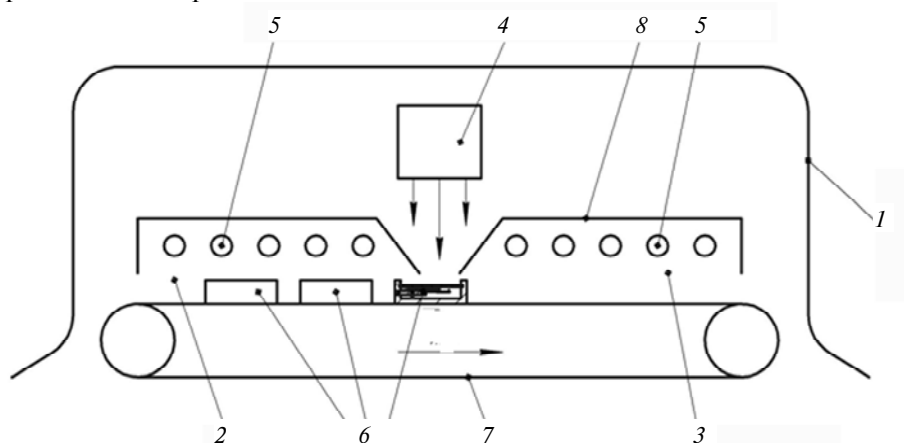


Рис. 3. Схема пристрою для обробки зразків: 1 – вакуумна камера; 2 – піч нагріву; 3 – піч охолодження; 4 – електронно-променева гармата; 5 – нагрівач; 6 – зразки; 7 – блок транспортування; 8 – тепловий екран.

Після завантаження зразків у вакуумну камеру в ній створювали робочий вакуум 10^{-2} – 10^{-4} Па. Далі їх поміщали в зону печі нагріву, де вони розігрівалися нагрівачами до попередньої температури 570–620 К, що унеможливує виникнення в них термонапружень. Більші температури не припустимі через можливість досягнення температури в зразку точки Кюрі, що призведе до деполяризації чутливих елементів АСМ.

Нагрівачі розташовані в печах нагріву і охолодження таким чином, щоб забезпечити рівномірний та однаковий за температурою нагрів (або охолодження) кожного з виробів. Екрани печей нагріву і охолодження мають багатшарову конструкцію і забезпечують термоізоляцію виробів у вакуумній камері. Після попереднього нагріву вироби за допомогою блока транспортування переміщують з печі нагріву спочатку в зону осадження тонких покриттів, а потім в зону дії електронного потоку гармати.

Інтенсивність електронного потоку і швидкість переміщення виробів під ним забезпечують необхідні умови його термічної дії на матеріал (оплавлен-

ня поверхневого шару нанесеного покриття). Після термічної мікрообробки електронним променем вироби потрапляють в піч охолодження, де охолоджуються протягом певного часу. Температура в печах регулюється електронними термодатчиками приладу РИФ-101.

Визначення допустимих режимів нанесення тонких впорядкованих покриттів методом термовакуумного осадження

Для визначення допустимих режимів осадження тонких впорядкованих покриттів на поверхнях нанометричного інструменту проводили пошарове формування на зразках атомарних покриттів методом резистивного осадження. Так, дослідження зразків-свідків, на які наносили тонку плівку з порошку осаджуваного матеріалу (виробник порошку осаджуваного матеріалу ТОВ “Порошкові нанотехнології”, м. Черкаси) дозволило визначити режими осадження: струм випарника $I = 75\text{--}150$ А, час осадження $t = 5\text{--}15$ с, середній розмір осаджуваних часток – $0,8\text{--}1,2$ мкм.

Визначення допустимих режимів електронної обробки на зразках-свідках [6]

На сформованому покритті отримували впорядковані структури через знімну молібденову маску. Подальша низькоенергетична електронно-променева мікрообробка отриманих покриттів приводила до випаровування буферного шару і, одночасно з цим, формування однорідного і впорядкованого покриття на поверхні діелектричних зондів. Створення буферного шару пов'язано з необхідністю збільшення когезійної міцності осаджуваного покриття і формування більш рівномірного покриття.

Параметри електронної мікрообробки, які визначали дослідним шляхом (описано в [5]), мали наступні значення: сила струму розігріву катоду $I = 50\text{--}150$ мА; прискорююча напруга $U_{\text{пр}} = 0,5\text{--}3,5$ кВ; час електронної мікрообробки $t = 0,1\text{--}5$ мкс.

Нанесення тонких вуглецевих покриттів на зонди АСМ з подальшою модифікацією електронним потоком

Процес комбінованого отримання тонких вуглецевих покриттів на зондах АСМ ґрунтується на методі комбінованого термовакуумного формування впорядкованих наноструктур на діелектричних поверхнях, в основу якого покладене термічне осадження у вакуумі тонких та ультратонких ($\sim 5\text{--}8$ нм) високооднорідних покриттів з подальшим формуванням на них впорядкованих структур нанометричних розмірів.

Особливістю такого комбінованого методу є здійснення його в одному технологічному циклі (термовакуумне осадження – електронно-променева модифікація покриття) за незмінних умов робочого середовища (вакуум $p = 5 \cdot 10^{-5}$ Па), що виключає утворення хімічних сполук осаджуваного покриття з елементами доквілля на проміжному етапі формування наноструктури.

Процес формування покриття здійснювали резистивним осадженням порошку вуглецю (графітна форма, дисперсність – $0,12\text{--}0,32$ мкм) за наступних режимів: струм нагрівача – 90 А; час осадження – 7 с; відстань від навіски з порошком до поверхні, на яку здійснювалося осадження – 30 мм; кут розпилювання – 120° .

На наступному етапі здійснювали електронно-променевою модифікацію сформованого покриття. Застосування в даному випадку стрічкового електронного потоку, генерованого електронно-променевою гарматою Пірса,

пов'язано з високою однорідністю і керованістю розподілу енергії в такому потоці, що дозволяє досягти більш щадного режиму прецизійної електронно-променевої обробки ультратонких покриттів на поверхнях кремнієвих зондів. Це, у свою чергу, виключає відшарування і розтріскування таких покриттів, чим обов'язково супроводжується процес різкого перерозподілу теплової енергії, що пов'язано з термічним ударом, який спостерігається при обробці точковими джерелами.

Електронно-променева модифікація покриттів здійснювали через маску за наступних режимів: питома потужність електронного потоку – 500 Вт/м^2 ; струм електронного потоку – 60 мА ; час модифікації – $4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

Після припинення процесу осадження відбувалася витримка протягом 10–15 с за умов постійної температури $360 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Перевірка якості нанесеного вуглецевого покриття

Після отримання зразків-свідків, їхню поверхню обов'язково перевіряли [6, 7] за наступними параметрами:

– субшорсткістю отриманого шару вуглецю методом атомно-силової мікроскопії (рис. 4);

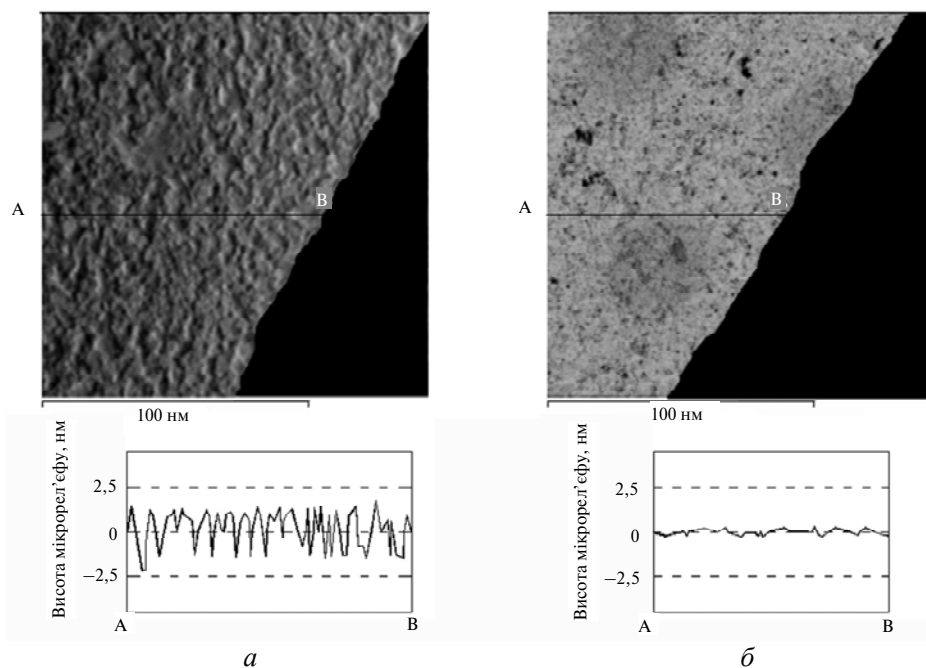


Рис. 4. Поверхня кремнієвого зонда Ultrasharp CSC38 та його мікропрофіль вздовж лінії А–В (електронний мікроскоп JEOL JSM-6700F, Японія): поверхня до модифікування (а) і відновлена термовакuumним осадженням вуглецю (б).

– мікротвердістю покриття на поверхні зразків (дослідження проводили в трьох точках на поверхні кожного зразка (рис. 5);

– адгезійною міцністю покриття до поверхні зразка методом склерометрії (рис. 6).

Результати проведених досліджень стану поверхні нанесеного вуглецевого покриття на кремнієвий зонд АСМ після його подальшої електронно-променевої мікрообробки показані на рис. 4.

Як можна побачити на рис. 4, підготовлений до осадження кремнієвий зонд має більш розвинений мікрорельєф. При цьому значення субшорсткості поверхні зонда, що була модифікована за запропонованим способом, зменшується з 2,5–5 нм до 0,1–0,3 нм. Також значно зменшуються кількість та розміри нанопор, що має поверхня кремнієвих зондів через технологічні особливості їх виготовлення [8]. Це, в свою чергу, зменшує загальну площу поверхні зонда (площу його контакту з досліджуваною поверхнею), чим збільшує точність досліджень, що проводяться таким зондом, та зменшує імовірність виникнення артефактів сканування на 20–22 %.

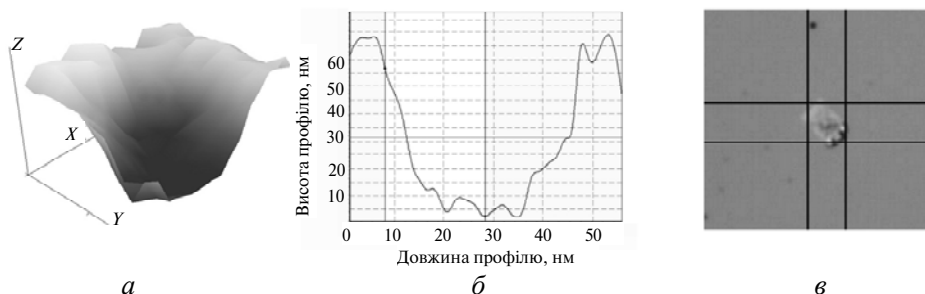


Рис. 5. Ділянка поверхні кремнієвої пластини (13×13 мкм) з відбитком наноіндентора (метод АСМ) (а); профіль відбитка модифікованого кремнієвого зонда АСМ (б); відбиток алмазної пірамідки (метод мікроіндентування) (в).

Результати дослідження мікротвердості модифікованого вуглецевим покриттям кремнієвого зразка та їх порівняння з результатами отриманими мікроіндентуванням за методом Вікерса на приладі DuroScan-10/20 наведено на рис. 5, де показано зону проникнення зонда-наноіндентора в поверхню зразка (див. рис. 5, а), профіль його відбитка (див. рис. 5, б) та відбиток алмазної пірамідки, що отримано методом мікроіндентування (див. рис. 5, в).

Порівняння значень мікротвердості, отриманих методами атомно-силової мікроскопії і мікроіндентування за Вікерсом, показало, що результати наноіндентування поверхонь кремнієвих пластин зондами CSC38, модифікованими вуглецевим покриттям, мають високу повторюваність та збіжність результатів з атестованим методом мікроіндентування за Вікерсом. Так, мікротвердість кремнієвої пластини, виміряна методом АСМ з використанням модифікованого вуглецевим покриттям кремнієвого зонда, становила $11,62 \pm 1,97$ ГПа, а отримана методом мікроіндентування за Вікерсом – $12,11 \pm 1,33$ ГПа. Максимальна розбіжність результатів вимірювання не перевищувала 5 %.

Зносостійкість зондів випробували за методом склерометрії. Дослідними зразками були тонкі (50 нм) покриття SiO_2 , випробування проводили при навантаженні на зонд – $5 \cdot 10^{-4}$ Н, АСМ-зображення результату склерометрії на прикладі SiO_2 з використанням кремнієвого зонда та кремнієвого зонда, модифікованого вуглецевим покриттям, наведено на рис. 6.

За результатами дослідження встановлено, що коефіцієнт зносостійкості при використанні модифікованого зонда склав 25,7 (для порівняння: коефіцієнт зносостійкості алмазу $k = 100$), тоді як при використанні кремнієвого зонда цей коефіцієнт становить 23,1, що пов'язано з більш швидким зношенням кремнієвого зонда без модифікування, а ніж модифікованого зонда.

Для оцінки терміну надійної експлуатації (розбіжність результатів не повинна перевищувати 5 %), модифіковані та немодифіковані зонди експлуату-

валися в контактному режимі при дослідженні кремнієвої пластини з періодичною перевіркою точності результатів при дослідженні калібрувальної решітки TGZ1. На рис. 7 наведено мікроснімки фрагмента поверхні зондів та калібрувальної решітки TGZ1 (отримано на растровому електронному мікроскопі JEOL JSM-6700F, Японія, в Центрі колективного користування “Токуо-Воєкі”, м. Київ) і результат сканування калібрувальної решітки вихідним кремнієвим зондом і модифікованим вуглецевим покриттям протягом 100 хв експлуатації.

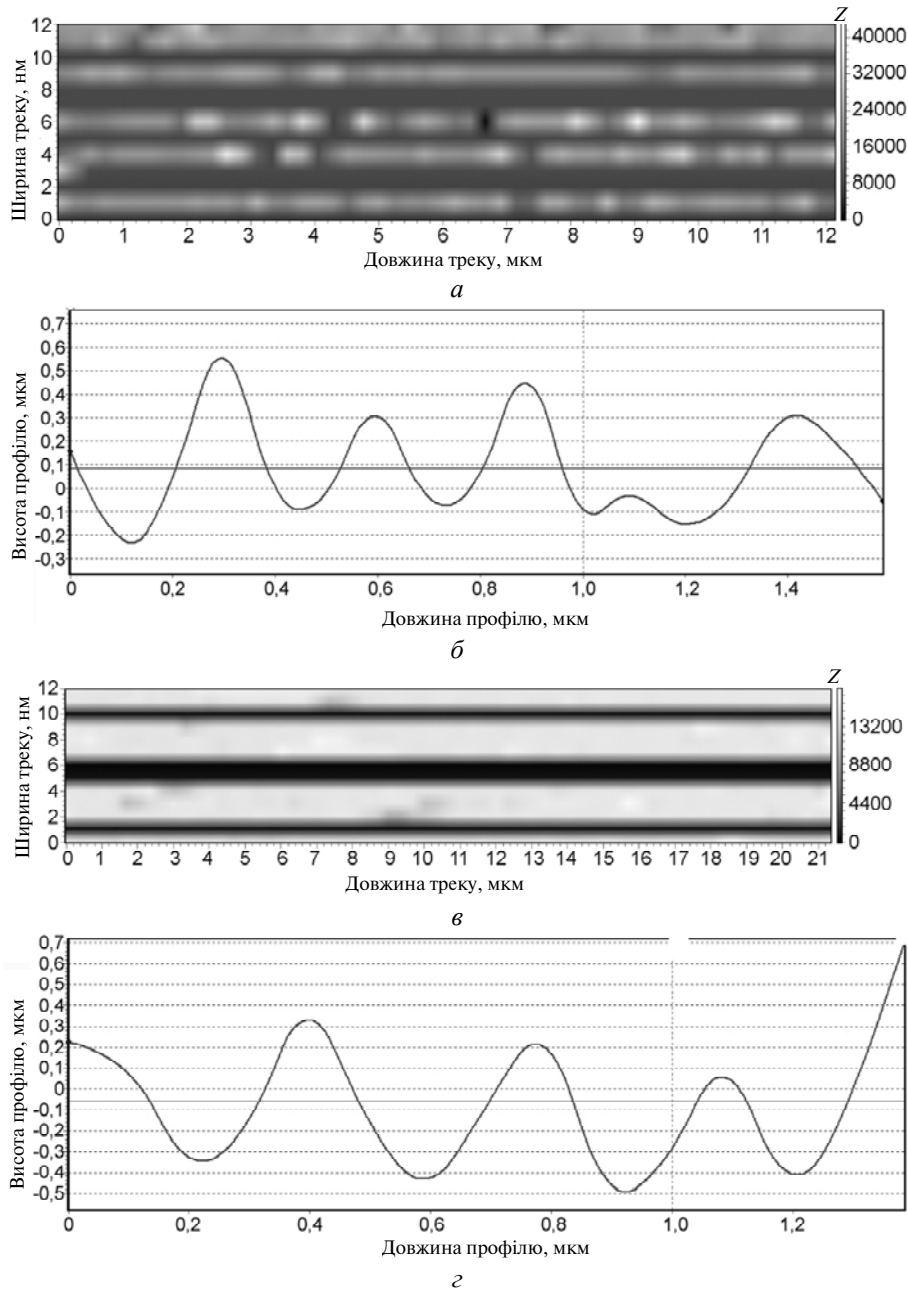


Рис. 6. АСМ-зображення (а, в) та топограми (б, з) результату склерометрії на тонкому (50 нм) покритті SiO₂ з використанням кремнієвого зонда вихідного (а, б) та модифікованого вуглецевим покриттям (в, з).

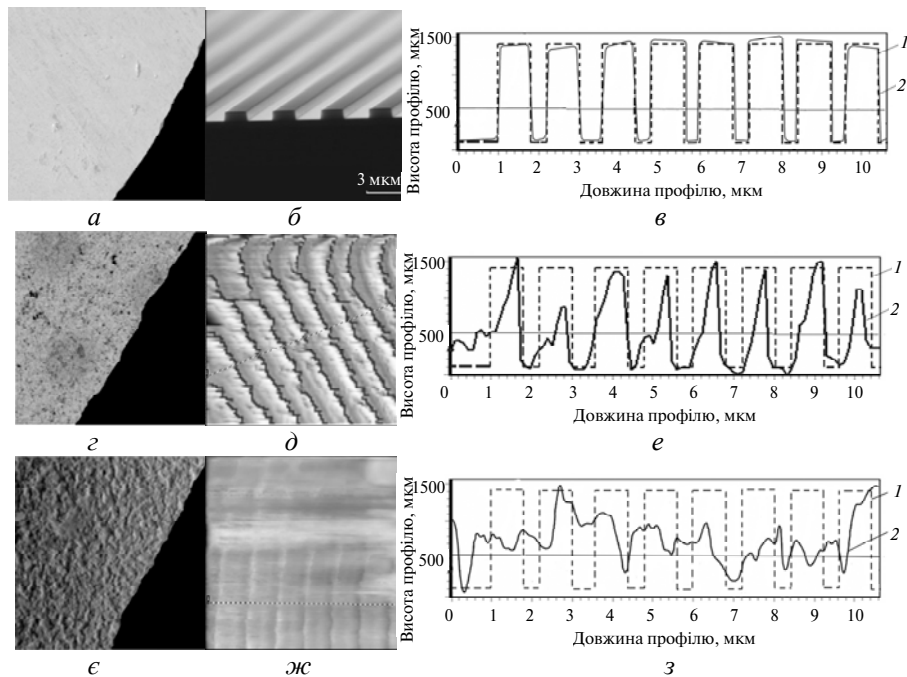


Рис. 7. Мікроснімки (*а, з, ж*) фрагмента поверхні кремнієвого зонда CSC38, СЕМ-зображення калібрувальної решітки TGZ1 (*б*), топограми ділянки її поверхні (*д, з*) та фрагменти профілю (*в, е, и*) поверхні TGZ1 (період – $2,2 \pm 0,05$ мкм); вихідні дані (*а–в*), після дослідження модифікованим (*з–е*) та не модифікованим (*е–з*) кремнієвим зондом (100 хв експлуатації): 1 – вихідний профіль калібрувальної решітки; 2 – профіль решітки, отриманий зондом, що експлуатувався.

В результаті проведених досліджень, при яких сканували рельєф калібрувальної решітки TGZ1 (висота рельєфу, що заявляється виробником (NT-MDT, Росія) становить $1,4 \pm 0,015$ мкм), було визначено час надійної експлуатації зонда (тобто максимальний час, за який висота рельєфу, що визначали, зменшувалося на 5 % – до значення 19,1–22 нм). Встановлено термін надійної експлуатації кремнієвих зондів для АСМ та граничний термін експлуатації до повного їхнього руйнування, а саме: термін надійної експлуатації зондів CSC38 складає 55–60 хв, кремнієвих зондів модифікованих вуглецевим покриттям – 100–110 хв; граничний термін експлуатації зондів CSC38 складає 80–115 хв, кремнієвих зондів модифікованих вуглецевим покриттям – 140–160 хв.

ВИСНОВКИ

Показана можливість модифікування кремнієвих зондів зносостійким вуглецевим покриттям, що приводить до покращення їхніх експлуатаційних властивостей (зменшує імовірність виникнення артефактів сканування на 20–22 %), а розроблена технологія та підібрані режими нанесення та модифікування покриттів можуть бути запропоновані фірмам-виробникам зондів.

Обрано технологію та визначено оптимальні режими нанесення тонких вуглецевих покриттів на кремнієві зонди АСМ шляхом використання зразків-свідків, яка полягала в осадженні порошку вуглецю резистивним випаровуванням у вакуумі (струм нагрівача – 90 А; час осадження – 7 с; відстань від навіски з порошком до поверхні, на яку здійснювалося осадження – 30 мм, кут розпилювання – 120°) з подальшою електронно-променевою

модифікацією отриманих покриттів електронним потоком стрічкової форми (питома потужність електронного потоку – 500 Вт/м^2 ; струм електронного потоку – 60 мА ; час електронної мікрообробки – $4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$).

Проведена перевірка якості нанесеного вуглецевого покриття, яка показала, що модифікування кремнієвих зондів АСМ тонким вуглецевим покриттям дозволило зменшити субшорсткість поверхні зонда (з $2,5\text{--}5,0 \text{ нм}$ до $0,1\text{--}0,3 \text{ нм}$), підвищити на $10\text{--}15 \%$ їхню мікротвердість та зносостійкість, що збільшує термін їхньої експлуатації на $45\text{--}55 \%$.

Показана возможность модифицирования кремниевых зондов атомно-силового микроскопа тонким износостойким углеродным покрытием, которое приводит к улучшению их эксплуатационных свойств (уменьшает вероятность возникновения артефактов сканирования на 20–22 %, увеличивает срок эксплуатации на 45–55 %). Предложены оптимальные режимы нанесения таких покрытий термическим испарением в вакууме с дальнейшей низкоэнергетической электронно-лучевой микрообработкой. Проведенная проверка качества нанесенного покрытия показала уменьшение субшероховатости поверхности зонда в 15–25 раз, а также увеличение микротвердости и износостойкости этих покрытий в 1,1–1,35 раза.

Ключевые слова: кремниевый зонд, атомно-силовая микроскопия, тонкое покрытие, электронно-лучевая микрообработка, износостойкость.

Retrofitting by thin wearproof carbon coverage it was conducted for the silicic probes of atomic-force microscope. It results in the improvement of its operating properties (diminishes probability of origin of artefacts of scan-out on 20–22 %, increases the term of exploitation on 45–55 %). The optimal modes of causing of such coverages thermal evaporation in a vacuum with a further low-energy electronic beam-processing were offered. Quality of the inflicted coverage control showed diminishing subroughness of probe surface in 15–25 times, increase of it microhardness and wearproofness in 1,1–1,35 time.

Keywords: silicic probe, atomic-force microscopy, thin coverage, beam-processing, wearproofness.

1. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Нижний Новгород: Российская академия наук. Ин-т физики микроструктур, 2004. – 110 с.
2. Detchenko A. P. Introduction to Fluorescence Sensing. – Springer Science + Business Media B.V., 2009. – 606 p.
3. Билоконь С. А., Бондаренко М. А., Андриенко В. А., Антонюк В. С. Исследование микротвердости тонких пленок методом наноиндентирования с помощью атомно-силовой микроскопии // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: 13-я междунар. науч.-практ. конф., 30 сент.–4 окт. 2013 г., Крым, г. Ялта, материалы конф. – Киев, 2013. – С. 20–21.
4. Антонюк В. С., Тимчик Г. С., Верцанова О. В. та ін. Микроскопія в нанотехнологіях: монографія – К.: НТУУ “КПІ”, 2014. – 260 с.
5. Ващенко В. А., Канашевич Г. В., Бондаренко М. О. та ін. Технологічні основи отримання металізованих покриттів на виробках мікрооптики та наноелектроніки електронно-променевим методом // Звіт з НДР (МОНУ); № ДР 0103U003689. – К., 2004. – 63 с.
6. Бондаренко М. О. Дослідження впливу низькоенергетичного електронного потоку на мікрогеометрію поверхонь п'єзокерамічних елементів // Научный и производственно-практический сборник по техническим и естественным наукам. – Одесса: Одесский политехнический ун-т, 2009. – Вып. 2(32). – С. 149–153.
7. Антонюк В. С., Бондаренко М. О., Бондаренко Ю. Ю. Дослідження тонких алмазоподібних покриттів і структур, сформованих термічним випаровуванням у вакуумі на п'єзокерамічних матеріалах // Сверхтв. материалы. – 2012. – № 4. – С. 45–55.
8. Агеев О. А., Федотов А. А., Смирнов В. А. Методы формирования структур элементов наноэлектроники и наносистемной техники: Учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 72 с.

Національний технічний ун-т України
“Київський політехнічний ін-т”

Надійшла 17.04.14

Черкаський державний технологічний ун-т