

PACS numbers: 07.79.Lh, 61.46.-w, 68.37.Ps, 68.65.-k, 81.07.-b, 81.16.Ta, 82.37.Gk

## **Особливості топографії наноструктур методом атомно-силової мікроскопії**

О. С. Литвин, П. М. Литвин, І. В. Прокопенко, Т. І. Шеремета

*Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,  
просп. Науки, 41,  
03028 Київ, Україна*

На прикладі реальних наноструктурованих поверхонь проаналізовано характерні особливості застосування метод мінімізації «ефекту зонду» в топографічних дослідженнях методом сканівної атомно-силової мікроскопії (АСМ). Подано практичні параметри оцінки ефективності комп'ютерної реконструкції зображень поверхні та її оптимізації. Показано, що комплексне застосування різних способів мінімізації спотворень геометричних розмірів наноструктурних елементів поверхонь, які виникають внаслідок скінченності розмірів вістря зонду, забезпечує одержання адекватних топографічних даних.

Peculiarities of 'tip effect' minimization techniques' usage in topometric investigations using scanning atomic force microscopy are analyzed using real nanostructured surfaces as examples. Practical parameters for the computer surface-image reconstruction efficiency evaluation and optimization are presented. As shown, the combined use of various techniques for minimization of distortions in geometrical sizes of surface nanostructures caused by finite tip sizes provides adequate topometric data.

В работе на примере реальных наноструктурированных поверхностей проанализированы особенности применения методов минимизации «эффекта зонда» в топографических исследованиях методом сканирующей атомно-силовой микроскопии (АСМ). Представлены практические параметры оценки эффективности компьютерной реконструкции изображений поверхности и ее оптимизации. Показано, что комплексное применение разных способов минимизации искажений геометрических размеров наноструктурных элементов поверхностей, которые возникают вследствие конечных размеров острия зонда, обеспечивает получение адекватных топографических данных.

**Ключові слова:** атомно-силова мікроскопія, «ефект зонду», комп'ютерна реконструкція зображення, «сліпа» реконструкція вістря зонду.

*(Отримано 15 червня 2007 р.)*

## 1. ВСТУП

Головним напрямком сучасних технологій в електроніці є мініатюризація приладів із використанням тих унікальних властивостей, яких набувають системи при переході до нанометрового рівня [1–5]. Оскільки фізичні властивості систем із низьковимірними елементами залежать від форми, розмірів, структури та впорядкування останніх, значний науково практичний інтерес має виявлення механізмів формування наноструктурних елементів (квантових точок, ниток, кілець, масивів нитковидних кристалів та ін.) та їх застосування при створенні приладних структур з наперед заданими характеристиками.

Сканівна зондова мікроскопія (СЗМ) є однією із потужних методів для діагностики широкого кола властивостей наноструктур та їх контрольованої модифікації [6–8]. Такі, широко відомі методи СЗМ як атомно-силова мікроскопія (АСМ) та тунельна легко досягають субнанометрової роздільної здатності на атомарно гладких та чистих поверхнях. Однак, при проведенні досліджень наноструктурованих поверхонь (поверхонь із розмірами окремих їх деталей порядку 1–10 нм) існує проблема «ефекту зонду» [6, 8]. У випадку, коли вістря зонду сумірно з елементами поверхні, взаємодіяти з ними можуть різні точки поверхні вістря, при цьому його геометрія може значно обмежувати роздільну здатність зображення у горизонтальній площині та спотворювати дані про реальні форму і розміри поверхневих структур. У такому випадку результатом вимірювань є згортка форми зонду СЗМ та форми досліджуваного нанооб'єкту. Тут слід зазначити, що під терміном «зображення» маються на увазі цифрові тривимірні карти рельєфу, представлені засобами комп'ютерної графіки у вигляді двовимірних відтінкових карт висот чи тривимірних аксонометричних побудов.

Проблему мінімізації «ефекту зонду» в результатах СЗМ топографії можна вирішувати двома шляхами. Перший — застосування зондів з надмалими розмірами вістря (радіус близько 1 нм). Тут найчастіше використовуються різні технології загострення звичайних кремнійових зондів та додаткового вирощування на вістрі кремнійового зонду нитковидних кристалів різноманітних матеріалів або вуглецевих нанотрубок [9–14]. Такий підхід забезпечує підняття роздільної здатності зображень до молекулярного рівня. Однак, у своїй більшості, ультрагострі зонди ефективні на поверхнях із розмахом висот до 20 нм (це не стосується спеціальних зондів для вимірювань вертикальних стінок деталей рельєфу мікронної висоти). Крім того, їх висока комерційна вартість та, часто, малий ресурс стають на заваді широкого використання.

Другий спосіб — це програмна реконструкція експериментально одержаних АСМ-зображень, при якій із зображення виокремлюється внесок зонду за відомою формою вістря [15–20]. При такому

підході ключовим є встановлення форми робочої частини вістря. Тут, окрім простого наближення поверхнею другого порядку [15], реальна форма вістря визначається за спеціальними тестовими структурами [21, 22], або за методом так званої «сліпої» реконструкції із вже виміряного зображення [17, 23, 24]. Метода наближення форми вістря поверхнею другого порядку дає найбільшу похибку і нами розглядатися не буде. Разом з тим, дві наступні методи також мають свої недоліки і переваги. Наприклад, використання тестових структур є оптимальним, коли їх геометричні параметри не просто менші за параметри вістря зонду, а є сумірними із деталями рельєфу, який передбачається досліджувати. Крім того, цей спосіб контролю форми вістря вимагає додаткових тестових вимірювань перед та після проведення топометричних досліджень поверхонь і є неефективним, якщо форма вістря змінилася в процесі вимірювань. У свою чергу, вістря зонду, відтворене за методом «сліпої» реконструкції, є вістряма максимально можливих розмірів, яким ще можна одержати зображення, яке реконструюється [23].

Таким чином, існуючі способи мінімізації «ефекту зонду» не є самодостатніми і забезпечити коректні результати топометричних досліджень наноструктурованих поверхонь можна тільки чітко розуміючи їх недоліки, переваги та межі застосовності. Саме цим питанням і присвячено пропоновану роботу.

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТ

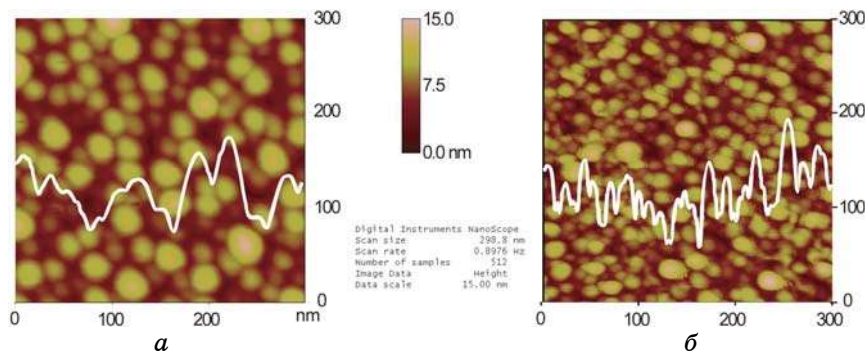
Дослідження виконувалися на СЗМ Quadrexed Dimension 3000 NanoScope IIIa із сканером типу G (Digital Instruments, США) за методом атомно-силової мікроскопії у режимі періодичного контакту. Використовувалися АСМ-зонди двох типів: звичайні кремнійові зонди NSG-11 із номінальним радіусом заокруглення вістря до 10 нм (NT-MDT, Росія) [25] та ультрагострі зонди DP14/HI-RES/Al BS з радіусом заокруглення вістря меншим 1 нм (MikroMasch, Росія) [26]. Радіус вістря звичайних зондів контролювався за тестовою ґраткою TGT1 (NT-MDT) [27].

Модельними зразками були наноострівцеві плівки Sn(Pb)Te на монокристалах  $\text{BaF}_2(111)$ , вирошені методом «гарячої стінки». Детальний опис методи одержання та параметри цих структур в залежності від технологічних режимів опубліковано, зокрема, в [28–30]. Програмна реконструкція експериментальних АСМ-даних здійснювалася в середовищі MathLab та Scanning Probe Image Processor.

## 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

### 3.1. Особливості застосування ультрагострих зондів

При топометричних дослідженнях наноструктурних елементів пове-



**Рис. 1.** АСМ-зображення НО SnTe на BaF<sub>2</sub>, одержане стандартним (а) та надгострим (б) зондами. Випадок щільного розташування НО на поверхні. Білі криві — перерізи зображень.

рхонь слід розрізняти величину роздільчої здатності самого СЗМ та зображення. Реальна роздільча здатність зображення визначається співвідношенням кроку сканування та радіусом вістря зонду. Так при апаратній точності горизонтального позиціонування сканера СЗМ, вищій за 0,5 нм, роздільча здатність зображення (крок сканування) розміром 500×500 нм, записаного у масив даних ємністю 512×512 точок, складатиме близько 1 нм. А виходячи із простих геометричних міркувань, зонд із радіусом вістря 10 нм зможе розділити дві точки поверхні, між якими є заглибина в 0,1 нм, починаючи з мінімальної відстані між ними в 3 нм ( $d_{\min} = \{4\Delta z(2R - \Delta z)\}^{0,5}$ , де  $R$  — радіус вістря зонду,  $\Delta z$  — глибина впадини між точками поверхні), реалізуючи при цьому роздільчу здатність 1,5 нм. Зрозуміло, що зменшуючи тільки крок сканування (наприклад, записуючи зображення 250×250 нм) досягнути вищої роздільчої здатності зображення не вдасться внаслідок надто великого радіуса вістря. В той же час, ультрагострий зонд із радіусом вістря 1 нм забезпечуватиме горизонтальну роздільчу здатність на рівні 0,5 нм і адекватним йому полем сканування буде 300×300 нм (рис. 1).

Із рисунку 1, а видно, що у випадку щільно розташованих нанострівців (НО) SnTe малих розмірів (порядку 5–20 нм) має місце значний «ефект зонду», який включає в себе як розширення НО, так і неможливість проникнення вістря у вузькі впадини між ними. У свою чергу використання ультра гострого зонду усунуло обидві причини спотворення даних (рис. 1, б). Порівняння даних вимірювання стандартним та ультрагострим зондами показав, що похибка визначення такого важливого для аналізу ростових процесів параметру, як коефіцієнт форми (відношення висоти до діаметру основи НО), при скануванні стандартним зондом досягає 55%.

Ситуація змінюється, якщо досліджувати НО розміром 15–60 нм,

розміщені на достатній відстані один від одного (рис. 2). Різниця між зображеннями, отриманими звичайним та ультрагострим зондами, зумовлена тільки розширенням зерна (вістря проникає до підкладки). Узагальнюючи результати аналізу розмірів зерен за рис. 2, можна побудувати залежність похибки вимірювань діаметрів НО від їх розмірів при використанні звичайних кремнієвих зондів із номінальним радіусом вістря 10 нм (рис. 3).

Наша залежність добре узгоджується із відомою наближеною формулою для корекції «ефекту зонду» [31]:

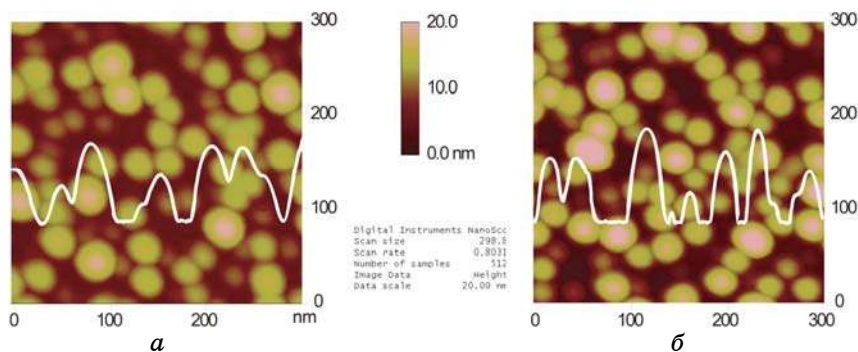


Рис. 2. АСМ зображення НО SnTe на  $\text{BaF}_2$ , одержане стандартним (а) та надгострим (б) зондами. Випадок вільного розташування НО на поверхні.

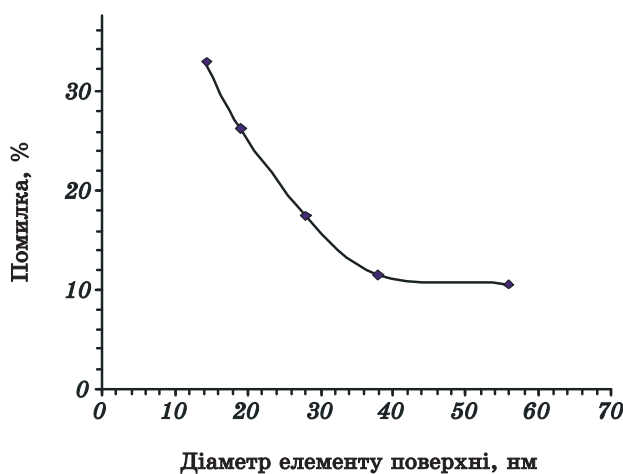
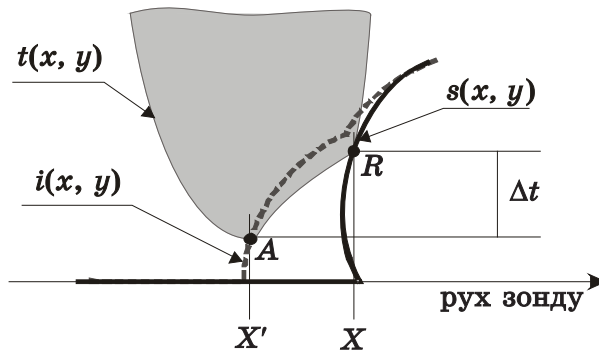


Рис. 3. Похибка вимірювання діаметру елементів поверхні залежно від їх латеральних розмірів у випадку сканування в режимі періодичного контакту кремнієвим зондом NSG 11 (NT-MDT, Росія) із радіусом заокруглення вістря 10 нм за зображеннями з рис. 2.



**Рис. 4.** До реконструкції реальної поверхні матеріалу за відомими формою вістря зонду та АСМ-зображенням:  $s(x, y)$  — реальна поверхня,  $t(\Delta X)$  — поверхня вістря,  $i(x, y)$  — нереконструйоване АСМ-зображення.

$$D = d\sqrt{(1 - 8Rh / d^2)}, \quad (1)$$

де  $d, h$  — діаметр та висота НО, одержані із АСМ-зображення.

Наведена рівність справедлива тільки у випадку, коли вертикальна роздільча здатність АСМ-зображень не залежить від радіуса зонду, тобто, коли відстань між сусідніми елементами поверхні більша його радіуса. Таким, чином у вказаному випадку (рис. 2) немає необхідності застосовувати ультрагострі зонди, для коректного аналізу елементів поверхні достатньо використання (1).

### 3.2. Усунення впливу геометрії АСМ-зонда на зображення поверхні методом комп'ютерної реконструкції

Основою всіх алгоритмів реконструкції є виділення двох точок на вістрі зонду: дійсна точка контакту вістря і поверхні ( $R$  — real) та так називана зображувальна точка вістря, рух якої відслідковує мікроскоп для формування зображення ( $A$  — apparent) [15]. Тоді для відновлення реального профілю поверхні в точці  $X'(x', y')$  потрібно в кожній її точці визначити два параметри (рис. 4):

- латеральну відстань між точками  $A$  та  $R$   $\Delta X = \Delta X(x', y') = X' - X$ ;
- вертикальну відстань між ними ( $\Delta t$ ).

Якщо  $s(x, y)$  — реальна поверхня,  $t(\Delta X)$  — поверхня вістря, то умовою їх контакту повинна бути спільна дотична в точці контакту:

$$dt(\Delta X)/d\Delta X = ds(X)/dX.$$

З другого боку, можна показати, що нахил нереконструйованої поверхні  $i(x, y)$  АСМ-зображення в точці  $X'$  дорівнює нахилу реаль-

ної поверхні в точці  $X$ :

$$di(X')/dX' = ds(X)/dX.$$

Звідси

$$dt(\Delta X)/d\Delta X = ds(X)/dX = di(X')/dX'. \quad (2)$$

Таким чином, маємо зв'язок всіх трьох функцій, а для однозначного розв'язку — сталу  $\Delta t$ .

Функцію  $t(\Delta X)$  в залежності від типу поверхні і потрібної точності реконструкції можна задавати різними способами:

- апроксимація вістря поверхнями другого порядку (як правило, параболоїдом обертання);
- визначення реальної форми вістря після сканування;
- за допомогою растрової електронної мікроскопії (форма встановлюється тільки частково);
- із застосуванням тестових зразків з елементами наперед заданих розмірів, менших чи співмірних із вістря (встановлюється тривимірна форма вістря);
- «сліпа» реконструкція (blind reconstruction) вістря тільки за одержаним АСМ-зображенням (встановлюється тривимірна форма вістря у наближенні вістря максимального розміру, здатного зареєструвати дане зображення).

З перелічених вище метод одержання форми вістря найбільш продуктивною є «сліпа» реконструкція. Метода не вимагає додаткових вимірювань, немає необхідності в експорті/імпорті масиву даних, які задають форму поверхні вістря, реконструюється тільки найбільш суттєва зображувальна частина вістря та ін. Однак при всіх перевагах дана метода має певні обмеження, які є неочевидними, але можуть суттєво вплинути на результати реконструкції.

Здійснення «сліпої» реконструкції вістря базується на таких положеннях [23, 24]: 1) жоден елемент зображення не може бути меншим вістря зонду, яким воно було одержане; 2) якщо в процесі сканування зонд торкався тільки однієї точки поверхні, то кожна точка зображення повинна співпадати з деякою точкою зовнішньої границі вістря (точкою дотику).

Приймається, що елементи зображення  $I$ , сумірні з розміром вістря, відтворюють його зовнішню границю  $P$ . За рекурентними співвідношеннями здійснюється порівняння границь вістря в кожній точці  $i$  зображення [23]:

$$P_{i+1} = \bigcap_{x \in I} [(I - x) \oplus P'_i(x)] \cap P_i, \text{ де } P'_i(x) = P_i \cap (x - I). \quad (3)$$

Зовнішньою межею вістря  $P_R$  є найвужча з усіх можливих:

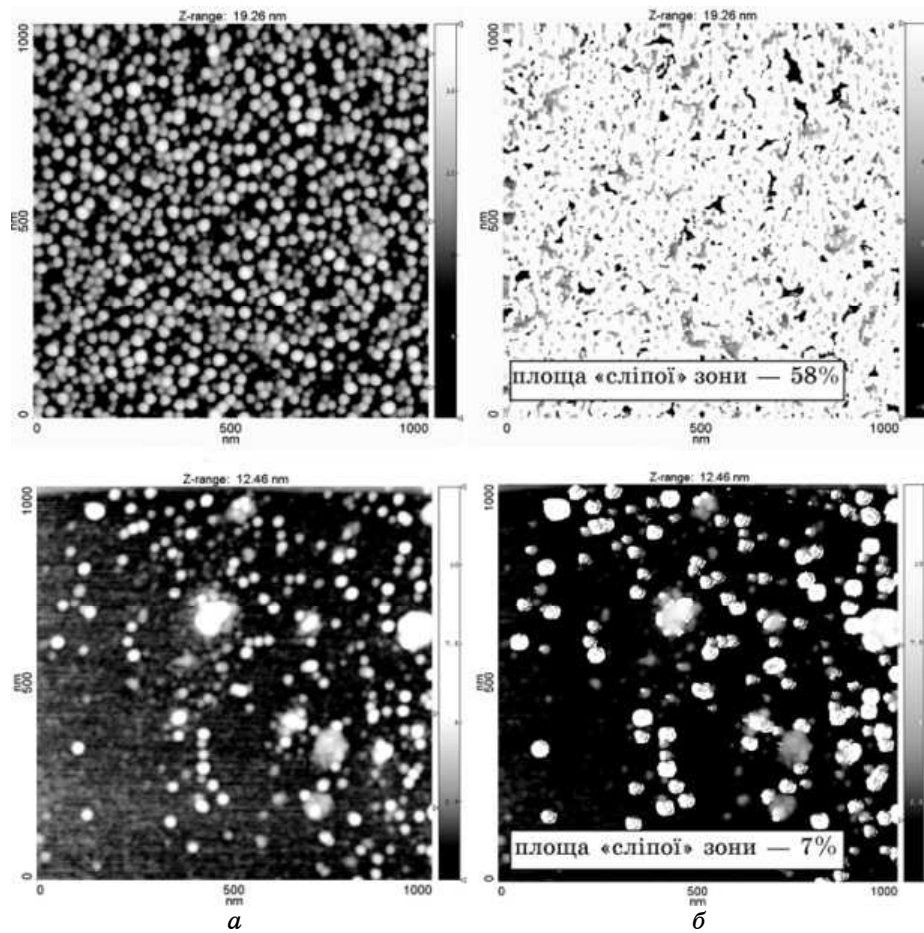


Рис. 5. Нереконструйовані АСМ-зображення (а) та їх карти вірогідності (б) для поверхонь із різним розміщенням та формою НО.

$$P_R = \lim_{(i \rightarrow \infty)} P_i. \quad (4)$$

За початкове значення форми вістря береться плоский зонд у достатньо великому okolí зображення. Типовим є наступне задавання  $P_0$ :

$$P_0 = \begin{cases} 0 & \text{для } |x| < s_x / 2 \text{ і } |y| < s_y / 2, \\ -\infty, & \end{cases} \quad (5)$$

де  $s_x \times s_y$  — площина АСМ-зображення поверхні.

В експериментальних дослідженнях, використовуючи зазначений вище алгоритм реконструкції вістря, ми виявили наступні особливості:



- 1) якщо поверхня регулярна (дифракційні ґратки, травлені монокристалічні поверхні, квантові точки близьких розмірів і форми тощо), то множина можливих границь вістря обмежена, що може привести до відображення регулярних елементів рельєфу у формі вістря;
- 2) при аналізі гладких поверхонь (розмах висот  $Z$  яких порядку 2–3 нм) множина можливих меж вістря охоплює тільки дуже малу його область —  $\Delta t$ , близьке до 0; це призводить до неправдоподібно великого радіуса заокруглення вістря зонду:

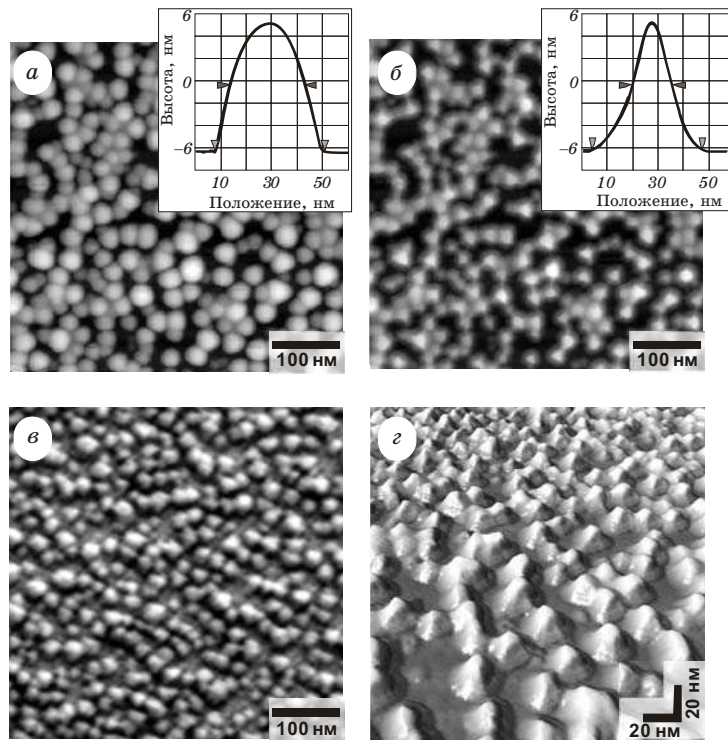
$$R \xrightarrow{z \rightarrow 0} \infty ;$$

- 3) різного роду апаратні ефекти, що не пов'язані із зондом, але проявились у зображенні (локальні викиди, шуми, дрейф сканера, надто велика/мала сила взаємодії зонду з поверхнею та ін.) знайдуть своє відображення у програмно відтвореній формі вістря;
- 4) відомо, що для коректного відтворення неперервної функції з дискретних значень при застосуванні ступеневої інтерполяції визначальним є крок дискретизації (крок сканування) [32].

При зміні розмірів поля сканування від  $0,1 \times 0,1$  мкм до  $100 \times 100$  мкм та розмірі матриці даних  $512 \times 512$ , крок сканування змінюватиметься від 0,2 до 195,3 нм. Тому, для коректної реконструкції поверхні зонду із радіусом заокруглення 10 нм можна використовувати тільки зображення розміром до  $1 \times 1$  мкм.

Слід також зауважити, що незалежно від способу одержання форми вістря зонду, реконструйоване зображення може точно співпадати з реальною поверхнею зразка при умові, що в процесі сканування в кожен момент часу вістря торкається тільки однієї точки поверхні, і, як наслідок, вістря при скануванні може торкнутись будь-якої точки поверхні. В іншому випадку залишатимуться так звані «сліпі зони» поверхні, відтворити які коректно неможливо. Їх форма і розмір залежатимуть від геометричної форми вістря зонду. Зокрема, для звичайного кремнійового зонду із вістря у формі чотирикутної піраміди; це — зони, розміщені під кутом відносно вертикалі, меншим, ніж кут при вершині піраміди величиною  $11^\circ$  [25] або пори, вужчі вістря зонду. Аल्горитм реконструкції АСМ-зображень дозволяє легко зобразити «сліпі» зони поверхні у вигляді так званих карт довіри (uncertainty map) (рис. 5), що може бути критерієм застосовності зонду даної геометрії. Якщо площа «сліпих» зон (відмічені білим кольором) складає понад 60% від загальної площі зображення, то програмна реконструкція буде некоректною і слід використовувати більш гострі зонди (див., наприклад, рис. 1).

Приклад застосовності програмної реконструкції зображень на поверхні із гранично допустимою площею «сліпих» зон для зразку з  $\text{HO SnTe}$  показаний на рис. 6. В даному випадку «сліпою» є зона при



**Рис. 6.** АСМ-зображення фрагменту поверхні і переріз НО системи SnTe/BaF<sub>2</sub> до (а) та після (б, г) комп'ютерної реконструкції; в — зображення поверхні у високороздільному (1 нм) цифровому електронному мікроскопі.

основі НО, тому реконструкція не приводить до змін розмірів основи острівця. В зв'язку з цим, на нашу думку, при аналізі розмірів НО як латеральну характеристику більш коректно застосовувати діаметр перерізу НО на половині його висоти (див. вставки на рис. 6, а, б), оскільки на цьому рівні реконструкція наближає розміри і форму НО до реальної, а у разі необхідності, значення основи розраховувати за екстраполяцією форми острівця.

Для порівняння на рис. 6, в показано зображення цього ж зразка у високороздільному (1 нм) цифровому електронному мікроскопі Zeiss Ultra 55. Видно, що на відміну від нереконструйованого зображення, де НО відображені у вигляді півсфер, на реконструйованому НО відображаються коректно — у вигляді трикутних пірамід (для наочності див. фрагмент тривимірного представлення), що повністю співпадає із даними електронної мікроскопії.

Крім викладених вище особливостей топографії елементів наноструктурних систем, пов'язаних із геометрією вістря зонду, слід пам'ятати про інші джерела спотворення рельєфу реальних повер-

хонь в результатах СЗМ-досліджень, таких як:

- спотворення, зумовлені сканером: нелінійна залежність видовження п'єзоелектричного матеріалу від прикладеної напруги, гістерезис, дрейф, старіння матеріалу;
- неоптимальні параметри сканування: крок та швидкість сканування, підсилення сигналу, тиск голки на поверхню;
- спотворення, привнесені некоректною цифровою обробкою даних;
- накладання неконтрольованих фізичних взаємодій зонд-поверхня.

Внесок тієї чи іншої з вищеназваних причин в СЗМ-зображення залежить від типу поверхні, режиму сканування та апаратного виконання самого мікроскопу. Однак мінімізувати чи навіть повністю виключити вплив цих причин на результати вимірювання значно легше у порівнянні з «ефектом зонду».

#### 4. ВИСНОВКИ

Таким чином, комплексне застосування способів мінімізації «ефекту зонду» в АСМ топометричних дослідженнях дозволяє коректно визначати розміри та форму наноструктурних елементів (зокрема наноострівців діаметром від 5–10 нм). При цьому контроль форми вістря зонду є обов'язковим. Застосування методи комп'ютерної реконструкції зображень за відомою формою вістря з одного боку дозволяє оцінити ступінь вірогідності зображення за «картами довіри» і зважити необхідність застосування ультрагострих зондів, а з іншого — дозволяє досить ефективно мінімізувати вплив «ефекту зонду» на поверхнях із «сліпими зонами» площею до 60%. Можна припустити, що реконструкція зображень, отриманих надгострими зондами також є коректною для поверхонь вимірюваних із вірогідністю, вищою за 40%. При цьому використання «сліпої» реконструкції для відтворення форми ультрагострих зондів є чи не єдиним реальним способом відтворити форму їх вістря у зв'язку із неможливістю виготовити відповідні тестові структури. Реконструкція АСМ-зображень, одержаних надгострими зондами при оптимальних кроках сканування та мінімальних спотвореннях, привнесених апаратними похибками, може забезпечити коректну топометрію НО в діапазоні діаметрів, менших за 5 нм.

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти та науки України (грант № М/175-2007).

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. B. Bhushan, *Springer Handbook of Nanotechnology* (Springer: 2004).
2. Ya. Masumoto and T. Takagahara, *Semiconductor Quantum Dots: Physics, Spectroscopy and Applications* (Springer: 2003).

3. V. A. Schukin, N. N. Ledentsov, and D. Bimberg, *Epitaxy of Nanostructures* (Springer: 2004).
4. Ч. Пул, Ф. Оуэнс. *Мир материалов и технологий. Нанотехнологии* (Москва: Техносфера: 2001).
5. Н. Кобаяси, *Введение в нанотехнологию* (Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний: 2005).
6. R. Wiesendanger, *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Methods and Applications* (Cambridge University Press: 1994).
7. W. I. Schultze, *Electrochemical Microsystem Technologies* (Taylor&Francis: 2002).
8. K. S. Birdi, *Scanning Probe Microscopes. Applications in Science and Technology* (CRC Press: 2003).
9. В. А. Быков, А. Н. Гологанов, Н. З. Салахов, Д. В. Шабратов, *Патент на изобретение № 2121657. Приоритет от 08.05.97.*
10. A. J. Melmed, *J. Vac. Sci. Technol.*, **9**, No. 2: 601 (1991).
11. В. А. Быков, *Микросистемная техника*, № 1: 21 (2000).
12. V. A. Bykov, V. V. Dremov, V. Losev et al., *Materials of the All-Russian Conference 'Probe Microscopy-2000'* (Nizhni Novgorod: IPN RAS: 2000), p. 298.
13. Г. В. Дедков, С. Ш. Рехвиашвили, *ЖТФ*, **69**, вып. 8: 124 (1999).
14. Sh. Kuwahara, S. Akita, M. Shirakihara et al., *Chemical Physics Letters*, **429**: 581 (2006).
15. D. Keller, *Surface Science*, **253**: 351 (1991).
16. А. А. Бухараев, Ф. Ф. Губайдуллин, А. В. Назаров, *Открытия. Изобретения*, № 44 (1992).
17. N. Bonnet, S. Dongmo, P. Vautrot, and M. Troyon, *Microsc. Microanal. Microstruct.*, **5**: 477 (1994).
18. А. А. Бухараев, Н. И. Нургазизов, А. А. Можанова, Д. В. Овчинников, *Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения*, № 3: 25 (2000).
19. S. Belikov and S. Magonov, *Japanese J. of Applied Physics*, **45**, No. 3B: 2158 (2006).
20. L. X Li., R. P. Liu, Z. Xu et al., *Measurement*, **39**: 12 (2006).
21. P. Markiewicz and M. C. Goh, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, No. 5: 3186 (1995).
22. U. Hubner, W. Morgenroth, H. G. Meyer et al., *Appl. Phys. A*, **76**: 913 (2003).
23. J. S. Villarrubia, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, **102**: 425 (1997).
24. L. S. Dongmo, J. S. Villarrubia, S. N. Jones et al., *Ultramicroscopy*, **85**: 141 (2000).
25. [http://www.ntmdt-tips.com/catalog/golden/non/products/NSG11\\_50.html](http://www.ntmdt-tips.com/catalog/golden/non/products/NSG11_50.html)
26. <http://www.spmtips.com/dp14/hires>
27. [http://www.ntmdt-tips.com/catalog/gratings/afm\\_cal/products/TGT1.html](http://www.ntmdt-tips.com/catalog/gratings/afm_cal/products/TGT1.html)
28. G. V. Lashkarev, M. V. Radchenko, E. I. Slynko et al., *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, **3**, No. 3: 295 (2000).
29. В. Н. Водопьянов, А. П. Бахтинов, Е. И. Слынько и др., *Письма в ЖТФ*, **31**, вып. 16: 88 (2005).
30. Т. І. Sheremeta, I. V. Prokopenko, P. M. Lytvyn et al., *Functional Materials*, **14**, No. 1: 86 (2007).
31. S. O. Ferreira, B. R. A. Neves, R. Magalhaes-Paniago et al., *J. Crystal Growth*, **231**: 121 (2001).
32. О. С. Велима, О. Д. Боличевцев, Й. І. Гребень, *Теоретичні основи централізованого контролю технологічних процесів: Навчальний посібник* (Київ: Вища школа: 1973).