

МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 681.723, 006.91

МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ

*Х.О. Надорожняк¹⁾, Л.А. Витвицька¹⁾, О.С. Литвин²⁾, П.М. Литвин²⁾, О.Є. Середюк¹⁾,
І.В. Прокопенко²⁾*

1)– Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 76000, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422)4-60-77.

2)– Інститут фізики напівпровідників (ІФН) ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ, 03028, м. Київ, проспект Науки, 41, (044)525-59-40.

Обґрунтовано необхідність розроблення та впровадження стандартів щодо метрологічного забезпечення скануючих зондових мікроскопів як найбільш перспективних засобів вимірювальної техніки в області нанотехнологій та їх використання при сертифікаційних, контрольних, інспекційних випробуваннях. Проведено метрологічний аналіз атомно-силового мікроскопа NanoScope IIIa Dimension 3000, розроблена його метрологічна модель та методика і засоби його калібрування. На основі експериментальних даних визначені розкиди значень геометричних параметрів поверхонь у нанометровому діапазоні 3D-вимірювань, викликані впливом різних джерел невизначеності.

Ключові слова: атомно-силовий мікроскоп, невизначеність, метрологічний аналіз, калібрування, 3D-вимірювання, нанотехнології.

Обосновано необходимость разработки и внедрения стандартов относительно метрологического обеспечения сканирующих зондовых микроскопов как наиболее перспективных средств измерительной техники в области нанотехнологий и их использования при сертификационных, контрольных, инспекционных испытаниях. Проведен метрологический анализ атомно-силового микроскопа NanoScope IIIa Dimension 3000, разработана его метрологическая модель и методика и средства его калибрования. На основе экспериментальных данных определены разбросы значений геометрических параметров поверхностей в нанометровом диапазоне 3D-измерений, вызванные влиянием различных источников неопределенности.

Ключевые слова: атомно-силовой микроскоп, неопределенность, метрологический анализ, калибрование, 3D-измерения, нанотехнологии.

Grounded necessity of development and introduction of standards in relation to the metrology providing of sweepable probe microscopes as most perspective facilities of measuring technique in the area of nanotechnology and their using for the certification, inspection proof-testing. The metrology analysis of atomic-power microscope of NanoScope IIIa Dimension 3000 is conducted, his metrology model and method and facilities of his calibration is developed. On the basis of experimental information variations of values of geometrical parameters of surfaces are determined in the nanometric range of 3D-measurement, caused by influence of different sources of uncertainty. Keywords: atomic-power microscope, uncertainty, metrology analysis, calibration, 3D-measurement, nanotechnology.

Розвиток мікро- і нанотехнологій пристроїв та матеріалів є одним із пріоритетних завдань соціально-економічного розвитку. У свою чергу трансфер технологій зі стадії досліджень через виробництво до комерційної ринку вимагає суттєвої інтенсифікації досліджень у відповідних галузях метрології [1-3].

Хоча під нанотехнологіями зараз розуміють науку і технологію структур, в яких розміри окремих елементів складають від 0,1 нм до 100 нм, нанометрологія суттєво перекидає цей діапазон. Вимірювання повинні проводитись із точністю (невизначеністю) в цьому і меншому розмірному діапазоні. Для вирішення таких

задач скануючі зондові мікроскопи (СЗМ) є ідеальними пристроями, що забезпечують 3D-вимірювання геометричних розмірів та різноманітних фізичних і хімічних властивостей об'єктів в розмірній шкалі від долей ангстрема до сотень мікрон. Проте ці, відносно нові, засоби вимірювань все ще вимагають розроблення стандартизованих процедур калібрування та адаптації відповідних стандартів для використання більш широкого кола контрольованих параметрів.

Роботи в даній галузі узгоджують відповідні міжнародні на національні організації. Зокрема, в 2005 р. у Міжнародній організації зі стандартизації (ISO) створено технічний комітет (ТК) 229 "Нанотехнології", а у 2006 р. у Міжнародній електротехнічній комісії (ІЕС) – ТК 113 "Нанотехнологія стандартизації для електричних та електронних виробів і систем" [4,5]. У Росії в рамках діяльності Державної корпорації «Російська корпорація нанотехнологій» (ДК «Роснанотех») створено Метрологічний центр "Роснано" та ТК 441 «Нанотехнології» [6], що розробив перші в Росії стандарти з нанотехнології як для атестації поверхонь на нанометровому рівні, так для атестації самих СЗМ [7-9]. Щодо самого метрологічного аналізу та метрологічного забезпечення вимірювань з використанням СЗМ роботи проводяться на рівні окремих науково-дослідницьких груп [10-14]. На жаль, в Україні в цьому напрямку здійснюються тільки перші кроки, а саме Україною разом із іншими країнами СНГ в рамках Міждержавної Ради по стандартизації, метрології та сертифікації підписано деякі стандарти для використання в області нановимірювань і, зокрема, методами СЗМ [7, 8].

На даний час найширшого використання у метрологічному супроводі технологічних процесів набула атомно-силова мікроскопія (АСМ), як один із методів СЗМ. Метод АСМ базується на використанні однієї з найбільш універсальних взаємодій в природі – притягиванні/відштовхуванні між тілами. Контрольно-вимірювальна система АСМ здійснює прецизійне растрове переміщення твердотільного зонду (мікромашини у вигляді вістря радіусом 5-30 нм), закріпленого на пружній консолі [15] над досліджуваною поверхнею, підтримуючи постійною силою взаємодії зонд-поверхня за рахунок зміни

висоти зонду над поверхнею. Значення напруг на п'єзоелементах трикоординатної системи переміщення (сканері) на основі попередніх калібрувань конвертуються програмним забезпеченням АСМ у тривимірні карти поверхні. Зауважимо, що при картографуванні рельєфу важливим є саме підтримання постійного значення прогину консолі зонду, який відображає рівнодійну всіх діючих сил з боку поверхні на зонд, зрівноважених силою його пружної деформації. Вимірювання абсолютних значень сили чи величини прогину в даному методі не є потрібними.

Переваги АСМ досліджень порівняно з іншими методами візуалізації та модифікації поверхонь з нанорозмірною роздільною здатністю наступні: вимірювання у 3D-форматі, відсутність процедури прободіготовки, можливість дослідження поверхні тіл з будь-яким типом провідності та механічними характеристиками, включаючи біологічні об'єкти, можливість вимірювання в будь-яких середовищах (вакуум, повітря, рідина). Це дозволяє АСМ набувати виключної важливості і дедалі ширше застосовуватися не тільки у фізиці, електроніці, матеріалознавстві, а й біології, медицині та інших галузях.

Проте в силу урізноманітнення напрямків прикладних задач, розв'язання яких здійснюється в специфічних умовах використання АСМ, а також удосконалення технологій виготовлення високопрецизійних деталей мікроскопа виникає необхідність створення не тільки спеціальних алгоритмів оброблення результатів вимірювання, але й адаптації програм метрологічної атестації АСМ як засобів вимірювання при сертифікаційних, контрольних, інспекційних випробуваннях. Саме тому виняткової важливості набувають відомості про можливі джерела виникнення інструментальних та методичних невизначеностей мікроскопа, а також способи їх усунення. Знаючи їх, можна здійснювати відповідні конструкційні вдосконалення АСМ, корегувати алгоритми проведення вимірювань, а також конкретизувати границі невизначеності вимірювання.

Метою роботи є аналіз джерел невизначеностей атомно-силового мікроскопа, дослідження способів їх усунення, а також розрахунок даних невизначеностей для встановлення точності результатів вимірювання та оптимізації процесу їх інтерпретації.

Метрологічний аналіз АСМ здійснювався на основі дослідження факторів впливу на точність вимірювання, їх класифікації за причинами, місцем та періодичністю виникнення для

типової комерційної моделі СЗМ NanoScope IIIa Dimension 3000 (виробництво фірми Digital Instruments, США) [16, 17]. В результаті аналізу розроблена метрологічна модель, представлена на рис. 1. Найбільший внесок в сумарну інструментальну невизначеність АСМ вносить невизначеність п'язосканера, який не має зворотнього контролю реальних переміщень, а також невизначеність, спричинена ефектом накладання форми вістря зонду на форму елементів вимірюваної поверхні. Можливим джерелом невизначеностей є лазерна оптична система вимірювання прогину консолі зонду. Важливими є точність позиціонування лазерного променя оптичної системи вимірювань на консолі зонду та центрування в позиційно чутливому детекторі променя, відбитого від консолі. Однак ці невизначеності мінімізуються використанням коректуючого алгоритму налаштування лазерної оптичної системи.

Цифрова електроніка забезпечує роздільну здатність вимірювань висот з кроком $1/2^{16}$ від діапазону висот нерівностей досліджуваної ділянки поверхні. В той же час, розмір матриці вимірювань обмежений 512x512 точками. Це означає, що скан 100×100 нм матиме

горизонтальну цифрову роздільну здатність $100 \text{ нм}/512 \approx 0.2 \text{ нм}$, а $100 \times 100 \text{ мкм}$, відповідно, $100 \text{ мкм}/512 \approx 200 \text{ нм}$. При цьому точність позиціонування сканера складає 1% від вибраного поля сканування. Що стосується невизначеностей в алгоритмах програмного забезпечення управління вимірюваннями, то вони мізерні. Можливі невизначеності, викликані некоректним вибором алгоритмів подальшого оброблення результатів вимірювань в аналітичному off-line програмному забезпеченні, тут не розглядаються, оскільки вже не відносяться до самого процесу вимірювань.

Слід виділити невизначеності, які не пов'язані із апаратною частиною АСМ. До таких відносяться невизначеності, внесені некоректним кріпленням зразка на предметному столику мікроскопа. В загальному випадку зразки повинні жорстко закріплюватися на столику при дотриманні паралельності площини досліджуваної поверхні та столика. Однак часто практикується кріплення зразків адгезивними полімерними плівками (вуглецевий або монтажний скоч) чи еластичними провідними клеями, які мають певну текучість, що не виключає неконтрольованих переміщень зразка.

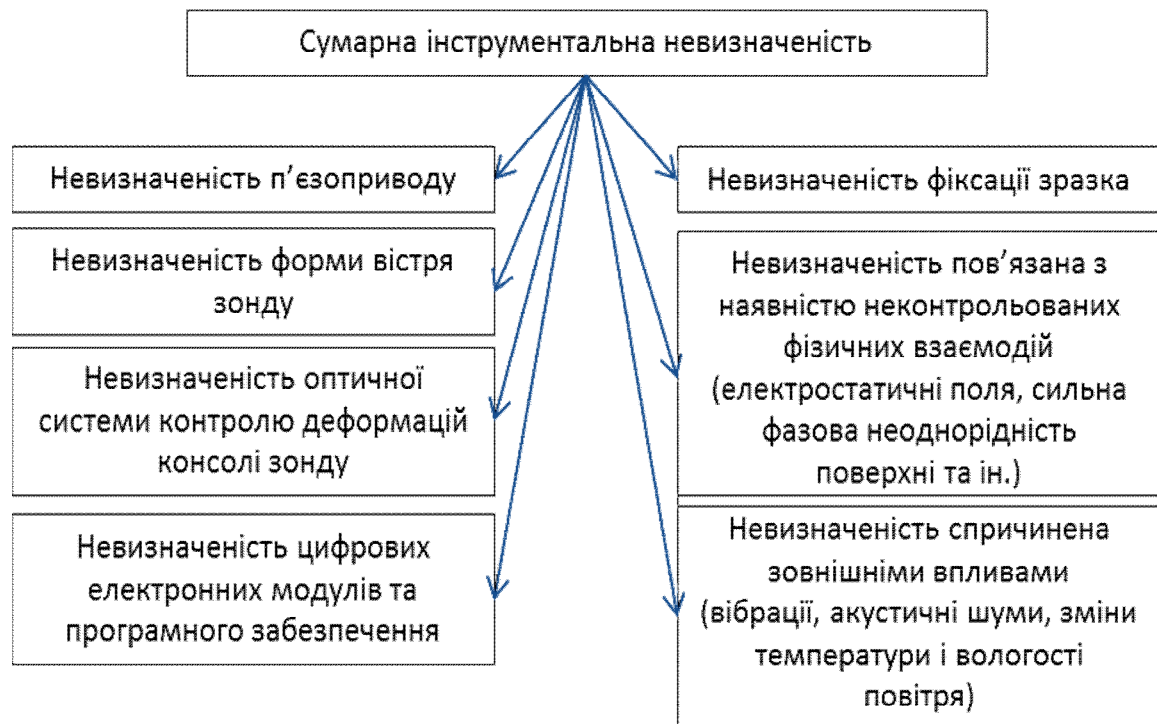


Рисунок 1 - Метрологічна модель АСМ

Зрозуміло, що даної невизначеності легко уникнути, в той час як незначна невизначеність, викликана неортогональністю осі вістря зонду площині поверхні, в тій чи іншій мірі буде завжди присутньою. Вона зумовлена тим же ефектом згортки форми вістря та реальної поверхні в результатах вимірювань, про який згадувалось вище. Дана невизначеність мінімізується програмними засобами АСМ та простими методичними прийомами (наприклад, паралельний запис різнонаправлених сканів чи поворот зразка на 180° у площині поверхні).

Важче мінімізуються невизначеності, зумовлені наявністю неконтрольованих вимірювальною системою АСМ фізичних взаємодій зонд-поверхня. Прикладами таких випадків можуть служити наявність сильного електростатичного поля навколо діелектричних зразків, що екранує більш слабкі силові взаємодії зонд-поверхня, на які налаштована вимірювальна система АСМ, чи присутність значної кількості конденсованої з повітря рідини чи іншого адсорбенту, який збільшуватиме адгезійну складову в силовій взаємодії зонд-поверхня. Дані невизначеності мінімізуються шляхом забезпечення належних умов вимірювань (заземлення чи витримування у вологій атмосфері діелектричних зразків перед вимірюваннями, очищення поверхні зразків чи проведення вимірювань в атмосфері інертного газу).

"Незручними" для вимірювань є зразки, елементи поверхні яких значно відрізняються за механічними властивостями. Наприклад, плазміди молекул ДНК на слюді. Оскільки характер силових взаємодій між кремнієвим вістрям зонду та мінеральними і органічними поверхнями суттєво різний, то досить важко підібрати оптимальні параметри вимірювань для обох поверхонь одночасно. В загальному випадку в такому зразку деталі поверхні слюди будуть виписані не ідеально, а органічна молекула буде дещо деформованою. В таких випадках рекомендується реєструвати по кілька ідентичних сканів з різними параметрами вимірювань.

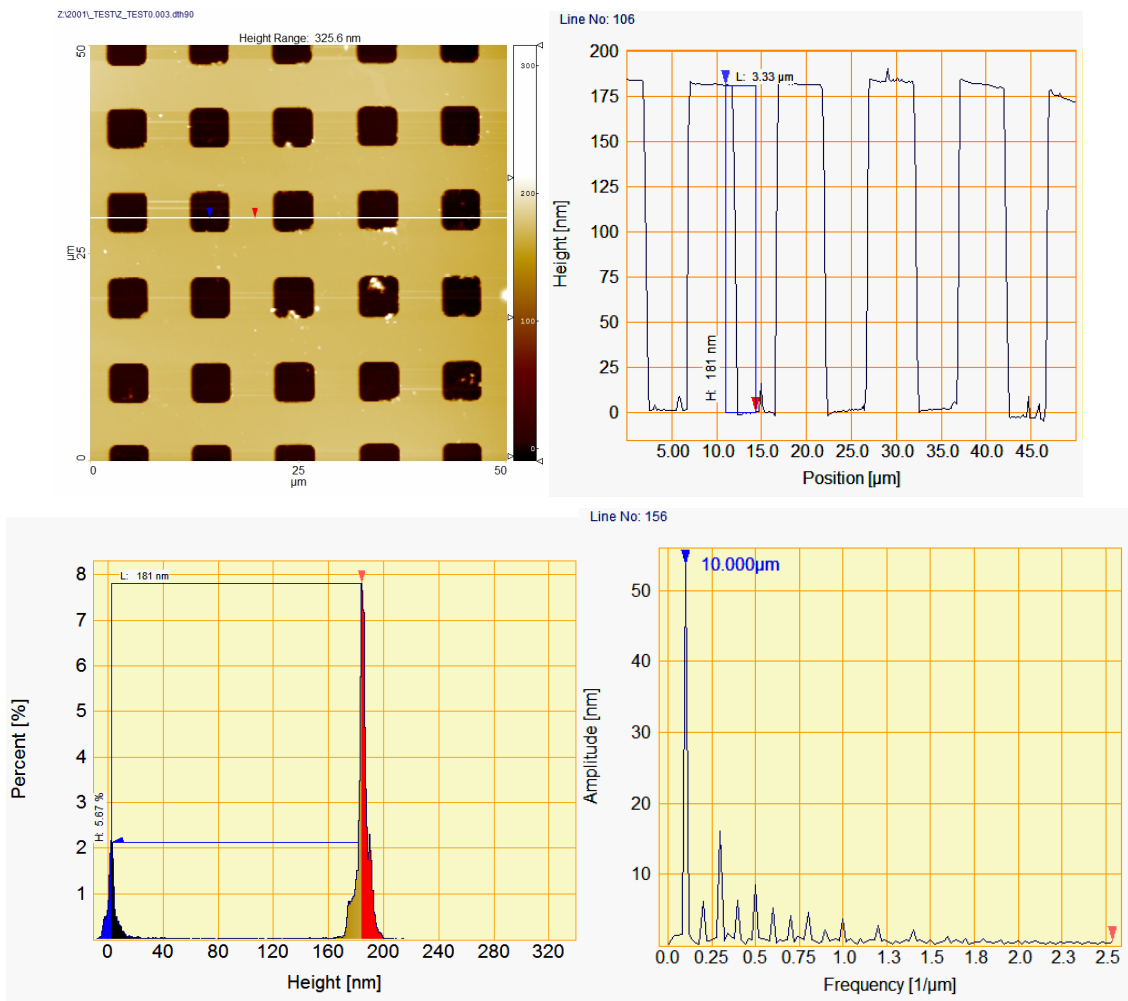
Також частим джерелом невизначеностей може бути недостатня захищеність АСМ від зовнішніх впливів: вібрацій, акустичних шумів, перепадів температури та вологості, нестабільності напруги живлення, сильних сторонніх електромагнітних полів тощо. Невизначеності такого типу мінімізуються шляхом забезпечення належних умов вимірювань: стабілізації параметрів атмосфери приміщення відповідними системами

кондиціонування, використання пасивних і активних систем вібро- та шумоізоляції, живлення СЗМ через джерела безперебійного живлення онлайнного типу, екранування приміщення та використання індивідуального електрометричного заземлення опором менше 1 Ом.

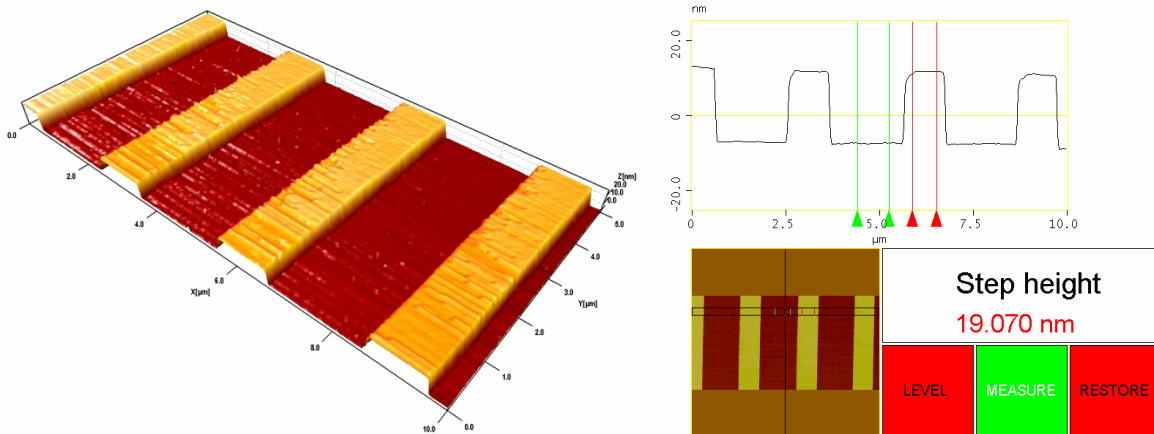
Кількісний розрахунок невизначеностей проводився для випадку вимірювань на повітрі при кімнатних умовах у режимі періодичного контакту кремнієвими зондами із радіусами заокруглення вістря до 10 нм та резонансними частотами в межах 130 – 320 кГц [18]. Розрахунок складових сумарної інструментальної невизначеності згідно із розробленою метрологічною моделлю проводився на основі припущення, що невизначеності цих складових відповідають типу В як такі, що оцінюються за границями зміни результату вимірювання та припущенням, що ймовірність появи певного результату в межах цих границь відповідає рівномірному закону розподілу.

В основному, метрологічне забезпечення АСМ для задач картографування поверхні полягає у калібруванні п'єзосканера в трьох діапазонах: субнанометровий (від 0.1 нм до 1.0 нм), нанометровий (від 1 нм до 500 нм) та мікронний (від 0.5 мкм до 4.0 мкм). Методика діагностики сканерів складається з двох основних частин: калібрування руху сканера в площині XY та по осі Z і здійснюється за допомогою спеціальних калібрувальних тестових структур, які, як правило, виготовляються за технологіями сучасної напівпровідникової наноелектроніки. В нашому випадку використовувались калібрувальна структура Au/Si від фірми-виробника СЗМ із глибиною елементів 180 ± 3 нм і періодом 10 мкм (рис. 2, а) та оксидкремнієві калібрувальні ґратки TGZ1 фірми NT-MDT (Росія) [19], в яких глибина западин складає 19 ± 1 нм (рис. 2, б). На рис. 2 подані результати АСМ вимірювань даних тестових структур.

Як слідує з тестів, проведених в різних розмірних діапазонах, границі відхилень виміряних значень розмірів тест-структур у горизонтальній та вертикальній площинах відповідають заявленим у технічних даних СЗМ, а, значить, точність АСМ вимірювань є не гіршою за точність дотримання виготовлення тест-структур. Зокрема, тести приведені на рис. 2, а, б, чітко ілюструють дотримання розмірності та ортогональності як у площині XY, так і у вертикальному напрямку в нанометровому діапазоні розмірів.



a)



б)

а – Au/Si: АСМ карта поверхні, профіль поверхні вздовж виділеної лінії, гістограма висот та Фур'є-перетворення профілю лінії висот; б – ґратка TGZI: 3D представлення карти поверхні та результати аналізу профілю

Рисунок 2 - Результати АСМ вимірювання тестових структур

Гістограма висот тест-об'єкту Au/Si показує найбільш статистично ймовірну товщину плівки золота 181 нм (відстань між її двома максимумами), а визначена Фур'є-перетворенням рельєфу найбільш характерна періодична частота становить 10,0 мкм. Відповідно і значення висоти сходинки тестової ґратки TGZ1, усереднене по 20 профілях, складає 19,1 нм.

Грунтуючись на проведених калібрувальних вимірюваннях, для нанометрового діапазону розмірів границі відхилень можна прийняти значення границь відхилень розмірів тест-структур $\Delta_{скан} = \pm 3$ нм. Отже, стандартна невизначеність сканера буде такою:

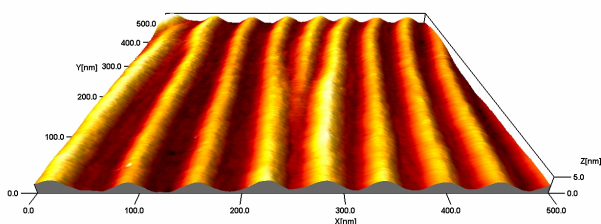
$$u_{скан} = \frac{\Delta_{скан}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,58 \text{ нм.} \quad (1)$$

Реальна (не цифрова) роздільна здатність АСМ зображення визначається геометричною формою і розмірами вістря зонду, оскільки саме зонд взаємодіє зі зразком і система вимірювань відтворює форму поверхні за просторовими координатами вершини його вістря. Як

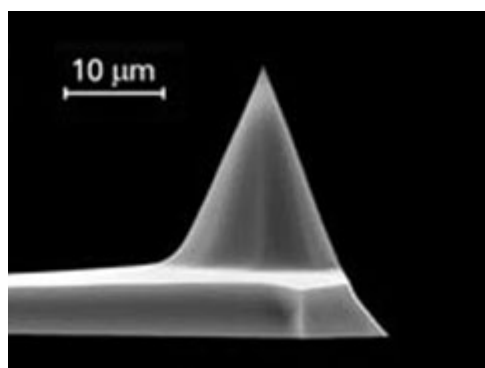
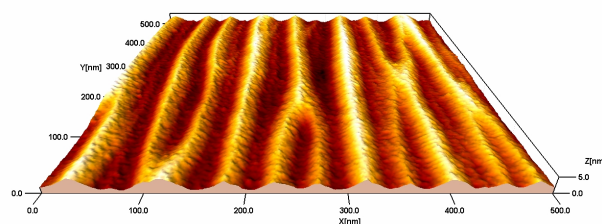
зазначалось вище, у зв'язку з тим, що радіус кривизни вістря зонда може бути співмірним із розмірами елементів поверхні, які до того ж не мають осесиметричної будови, то АСМ-зображення буде «згортокою» форми зонда і реального рельєфу поверхні. На рис. 3 наведені 3D-АСМ зображення квантових ниток InGaAs/GaAs, отриманих типовим зондом [20] з радіусом вістря біля 10 нм (рис. 3, а), та ультрагострим зондом [21], радіус вістря якого менший 1 нм (рис. 3, б). Діапазон розмірів по вертикалі складає 5 нм. Видно, що за рахунок згортки вістря втрачена інформація про тонку структуру ниток, а також завищеними є їх поперечні розміри. Відхилення можуть складати 60% від реальних висот. Отже, на основі статистичного аналізу зображень АСМ, отриманих типовим та ультрагострим зондами, розраховане значення невизначеності типового зонду радіусом вістря 10 нм в субнанометровому діапазоні (до 1 нм) буде таким:

$$u_{зонда} = \frac{\Delta_{зонда}}{\sqrt{3}} = \frac{0,6}{\sqrt{3}} = 0,346 \text{ нм.} \quad (2)$$

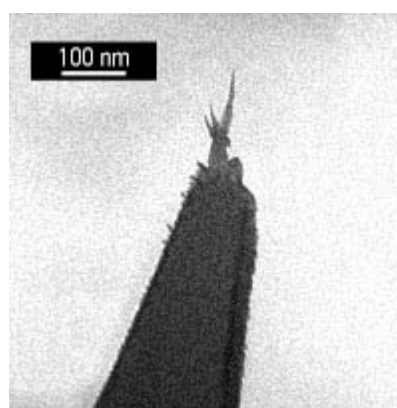
6_16_3114_2um n04 ah Gaea_1st_7d



6167_160_12_1x16 n06 ah com_257 x257



а)



б)

а – АСМ зображення отримані типовим зондом; б - ультрагострим зондом

Рисунок 3 - 3D-АСМ зображення (вгорі) та в електронному мікроскопі (внизу) квантових ниток InGaAs/GaAs

Зазначимо, що форму віртуальної поверхні, отриману АСМ можна суттєво наблизити до реальної, використовуючи методи комп'ютерної реконструкції АСМ-даних, які базуються на алгоритмах деконволюції (розгортання) форми вістря і віртуальної поверхні [22]. Однак, ефективна реконструкція поверхні зразка можлива лише при дотриманні двох умов: зонд в процесі сканування торкнувся усіх точок поверхні і в кожен момент зонд торкався тільки однієї точки поверхні.

При побудові метрологічної моделі АСМ слід зазначити, що результати вимірювання можуть спотворювати зовнішні впливи, такі як вібрації, акустичні шуми, зміна температури навколишнього середовища тощо. Крім того, "цифровий" шум та варіації чутливості лазерної оптичної системи можуть вносити певні похибки. Невизначеності, внесені названими чинниками, можна оцінити за тестом амплітуди шумів АСМ за умови виключення впливу п'єзоприводу та зонду. Даний тест був реалізований шляхом сканування поля розміром 1x1 нм (що для сканера з максимальним полем сканування 100x100 мкм означає практично статичний режим) поверхні свіжого сколу слюди. Тест проводився протягом часового інтервалу, еквівалентного типовому часу вимірювань (10-30 хв.). В результаті тестів було встановлено, що амплітуда шумів не перевищує 0.05 нм.

Отже, сумарна складова невизначеностей цифрової електроніки та оптичної системи АСМ, системи вібро-шумоізоляції та систем кондиціонування, екранування і електрометричного заземлення не перевищує

$$u_{opt} = \frac{\Delta_{vibr}}{\sqrt{3}} = \frac{5 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{3}} = 0,029 \text{ нм.} \quad (3)$$

Таким чином, максимальна сумарна невизначеність мікроскопа, розрахована за найбільш впливовими вищенаведеними складовими, між якими відсутній кореляційний зв'язок, для нанометрового діапазону буде такою:

$$u_{sum} = \sqrt{u_{скан}^2 + u_{зонда}^2 + u_{opt}^2} = 0,6746 \text{ нм.} \quad (4)$$

Даний метрологічний аналіз та метрологічне забезпечення обґрунтовують достовірність результатів тривимірного АСМ картографування геометричних параметрів поверхонь у нанометровому діапазоні розмірної шкали та дають змогу використовувати АСМ даної моделі як засіб для проведення сертифікаційних,

контрольних, інспекційних випробувань з документуванням отриманих результатів. Роботи з метрологічного аналізу та забезпечення АСМ частково проводились за кошти проекту № 3.6.1.10/11 Державної цільової науково-технічної програми «Нанотехнології та наноматеріали» на 2010-2014 роки.

Даний засіб вимірювання, що є складовою системи управління якістю науково-дослідницьких робіт (ISO 9001), яка функціонує у Інституті фізики напівпровідників НАНУ, може бути використаний науково-дослідними установами НАНУ, дослідницькими групами ВУЗів та підприємствами України при виконанні прикладних досліджень та розробці перспективних технологій для їх метрологічного забезпечення.

1. Singleton L. Analysis of the MEMSTAND survey on standardization for microsystems technology / L. Singleton, R.K. Leach, Z. Cui // Proc. Int. Seminar MEM-STAND. – Barcelona, Spain, 2003. – P. 11-31.
2. MEMS Industry Report: 2003 'Focus on Fabrication'. – MEMS Industry Group, Pittsburgh, USA, 2003.
3. Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. – London: The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, 2004. – 116 p.
4. International Organization for Standardization: TC 229 «Nanotechnologies». – Mode of access: WWW.URL: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?commid=381983. – Last access: 2010.
5. International Electrotechnical Commission: TC 113 «Nanotechnology standardization for electrical and electronic products and systems». – Mode of access: WWW.URL: http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:0:::FSP_ORG_ID:1315. – Last access: 2010.
6. Государственная корпорация «Российская корпорация нанотехнологий» (РОСНАНО). – Режим доступа: WWW.URL: <http://www.rusnano.com/Home.aspx>.
7. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 8.592-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления. – Москва, Стандартинформ, 2010 – 11 с.
8. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 8.593-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые.

- Методика поверки. – Москва, Стандартинформ, 2010 – 17 с. 9. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ 8.700-2010. Государственная система обеспечения единства измерений. Методика измерений эффективной высоты шероховатости поверхности с помощью сканирующего зондового атомно-силового микроскопа. – М.: Стандартинформ, 2010 – 30 с. 10. Leach . R.K. *The European nanometrology landscape* / R.K. Leach, R. Boyd, T. Burke, H.-U. Danzebrink, K. Dirscherl, Th. Dziomba, M. Gee, L. Koenders, V. Morazzani, A. Pidduck, D.l Roy, W.E.S. Unger, A. Yacoot // *Nanotechnology* 22 (2011), P. 062001 (15pp). 11. G. Dai, F. Pohlenz, H.-U. Danzebrink, M. Xu, K. Hasche, G. Wilkening. *Metrological large range scanning probe microscope* // *Rev. Sci. Instrum.* 75, P. 962-969 (2004). 12. Голубев С.С. Разработка и исследование методов и средств метрологического обслуживания сканирующих зондовых микроскопов. Диссертация на соиск. уч.ст. канд. техн. наук, спец. 05.11.15 «Метрология и метрологическое обеспечение», Москва, 2008. 13. *Nanoscale Calibration Standards and Methods Dimensional and Related Measurements in the Micro- and Nanometer Range* // Edited by G. Wilkening, L. Koenders. –WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005 – 528 p. 14. R. V. Lapshin (2004). *Feature-oriented scanning methodology for probe microscopy and nanotechnology* / R. V. Lapshin // *Nanotechnology* 15 (9): 1135-1151. DOI:10.1088/0957-4484/15/9/006. ISSN 0957-4484. 15. http://www.nanoworld.com/probes_catalog.html. 16. *NanoScope Command Reference Manual. Version 4.42.* – Digital Instruments, a division of Veeco Metrology Group, Inc, 1999. 17. *Dimension™ 3000 Instruction Manual. Version 4.22ce-01mar97.* – Veeco Instruments Inc., 2004. 18. http://nanoworld.com/prob_cat_01.html. 19. http://www.ntmdt-tips.com/catalog/gratings/afm_cal/products.html. 20. <http://www.spmtips.com/nsc/15/>. 21. <http://www.spmtips.com/dp/14/hires/albs>. 22. J.S. Villarrubia. *Algorithms for Scanned Probe Microscope Image Simulation, Surface Reconstruction and Tip Estimation* /J.S. Villarrubia // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology.* – 1997. – Volume 102, Number 4. – P. 425-454.

Поступила в редакцію 17.05.2011р.

**Рекомендував до друку канд. техн. наук,
проф. Чеховський С. А.**