

УДК 006.91:621.385.833.28

А. С. Шантир,
Д. С. Шантир, канд. техн. наук

КОМП'ЮТЕРНА НАНОСКОПІЯ – СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Наведено огляд та аналіз сучасних засобів наноскопії. Обґрунтовано використання растрових електронних мікроскопів як засобів вимірювання лінійних розмірів нанорозмірних об'єктів. Розглянуто основні засоби та методи оцінювання характеристик точності растрових електронних мікроскопів.

Ключові слова: мікроскоп, наноскоп, невизначеність.

A. Shantyr,
D. Shantyr, PhD.

COMPUTER NANOSCOPY – STATE AND PERSPECTIVES

Modern instruments for nanoscopy were reviewed and analyzed. Substantiated usage of scanning electron microscopes as instruments for nanoscale objects linear dimensions measuring. Considered basic instruments and methods for scanning electron microscopes accuracy characteristics estimation.

Keywords: microscope, nanoscope, uncertainty.

А. С. Шантырь,
Д. С. Шантырь, канд. техн. наук

КОМПЬЮТЕРНАЯ НАНОСКОПИЯ – СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Проведен обзор и анализ современных средств наноскопии. Обосновано использование растровых электронных микроскопов как средств измерения линейных размеров наноразмерных объектов. Рассмотрены основные средства и методы оценивания точностных характеристик растровых электронных микроскопов.

Ключевые слова: микроскоп, наноскоп, неопределенность

Вступ. Сукупний об'єм світового ринку засобів мікроскопії обраховується десятками мільярдів гривень і за прогнозами матиме щорічне зростання CAGR $\approx 10\%$. Ринок умовно поділено на три сегменти: оптичні мікроскопи ($>30\%$), скануючі зондові мікроскопи ($<20\%$) і мікроскопи, які опромінюють зразок зарядженими частинками ($>50\%$). Частка ринку відповідна мікроскопам, які працюють у нанометровому діапазоні (наноскопам), у кожному сегменті за прогнозами зростатиме приблизно на 20% щорічно. Це пов'язано з тим, що традиційні технології підходять до своєї фізичної межі та не забезпечують вирішення новітніх наукових і технічних проблем, впроваджуються нові технології. В першу чергу йдеться про технологію напівпровідників (традиційно на основі кремнію), для якої продуктивність отриманих систем збільшується зі зменшенням розмірів напівпровідникових елементів.

У 2011 р. компанія Intel перша запровадила 22 нм технологічний процес Ivy Bridge (22 нм – роздільна здатність, для виготовлен-

ня затвору використано гафній). Активно впроваджуються технології MEMS (Micro Electro Mechanical Systems – мікроелектромеханічні системи), які в свою чергу використовують адаптовані технологічні цикли – Bulk Micro machining (об'ємна мікрообробка), Surface Micromachining (поверхнева мікрообробка), LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung – літографія, гальванотехніка, пресування/формування). Всі ці технології потребують відповідних засобів контролю та вимірювання. Таким чином, одним з основних факторів подальшого успішного розвитку технологій стає випереджаючий розвиток їх метрологічного забезпечення, в першу чергу, забезпечення єдності лінійних вимірювань в нанодіапазоні і суміжних діапазонах.

Постановка задачі

На практиці вимірювання в нанометровому діапазоні проводяться наноскопами – комп'ютеризованими вимірювальними системами, розміщеними у споживача, і потребують проведення попереднього калібрування. Мікроскопи не можна транспортувати і необхідно калібрувати на робочому місці. Таке калібрування проводиться з викорис-

танням еталонних зразків – лінійних мір малої довжини.

Отже актуальним завданням вимірювань лінійних розмірів матеріального об'єкта є забезпечення точності і простежуваності. В контексті виконання цього завдання в даній статті проведено огляд та аналіз сучасних засобів мікроскопії, стану їх метрологічного забезпечення та обґрунтування растрових електронних мікроскопів як засобу вимірювання лінійних розмірів нанорозмірних об'єктів.

Сучасні засоби наноскопії

Основним засобом наноскопії є мікроскоп, який дозволяє працювати в нанометровому діапазоні – наноскоп.

Оптичні наноскопи.

Сучасні оптичні наноскопи (ОН) мають більші можливості ніж просте спостереження зразків, що забезпечується використанням спеціальних методів і часто потребують додаткового обладнання. До цих спеціальних методів відноситься мікроскопія:

флуоресцентна – для вивчення властивостей органічних і неорганічних зразків з використанням явищ флуоресценції і фосфоресценції на додаток (або замість) до відбиття і поглинання світла. До флуоресцентної мікроскопії відноситься епіфлуоресцентна мікроскопія і конфокальна мікроскопія (зазвичай використовує нелінійні властивості флуоресцентних зразків). Роздільна здатність досягає $d \sim 10\text{ нм}$. Основні галузі застосування: біомедицина, металографія, криміналістика;

ультрафіолетова – метод, в якому для освітлення зразка використовується ультрафіолетове світло (за рахунок меншої довжини хвилі ($< 300\text{ нм}$) досягається більша роздільна здатність). Основні галузі застосування – біомедицина, мінералогія;

інфрачервона – забезпечує візуалізацію і збір даних для інфрачервоної спектроскопії, отримання інфрачервоного хімічного зображення, контраст якого визначається чутливістю ділянок зразка до інфрачервоного випромінювання. Основні галузі застосування: загальна хімія, біологія, мінералогія, матеріалознавство, дослідження полімерів, криміналістика;

поляризаційна – призначена для дослідження взаємодії зразків поляризованим сві-

тлом. Поляризоване світло дає змогу виявити елементи структури об'єктів, які лежать за межами звичайної оптичної роздільної здатності;

темнопольна – дозволяє подолати труднощі, пов'язані з прозорістю «живих» матеріалів. Зразок розглядається при освітленні з таким кутом, при якому пряме світло не може потрапити в об'єктив. Зображення формується світлом, дифрагованому на об'єктиві, в результаті чого об'єктив контрастує з темним фоном;

фазово-контрастна – застосовується для прозорих зразків, зокрема живих клітин. З використанням спеціальних пристроїв частина світла, яка проходить через мікроскоп, зсувається за фазою на половину довжини хвилі відносно іншої частини світла, таким чином досягається контраст на зображенні;

інтерференційна – вдосконалена фазово-контрастна мікроскопія. Інтерферують два світлових промені, один з яких проходить наскрізь через зразок, а інший відображається. Метод дає змогу отримувати зафарбовані зображення, які дають цінну інформацію про досліджувані «живі» зразки.

Широкого використання набули ближньопольні оптичні мікроскопи (NSOM – Near-field Scanning Optical Microscope), мікроскопи з продавленням спонтанного випромінювання (STED – Stimulated Emission Depletion Microscopy), двофотонні лазерні мікроскопи (2-photon excitation microscopy).

NSOM забезпечує роздільну здатність кращу, ніж у звичайного мікроскопа за рахунок детектування розсіювання світла від зразка на відстанях менших за довжину хвилі світла. Зонд мікроскопа укомплектований пристроєм просторового сканування. Такий мікроскоп дозволяє отримувати растрові зображення по верхній поверхні зразка з роздільною здатністю нижче дифракційної межі.

STED – різновид флуоресцентного мікроскопа, який вирішує проблему недостатньої контрастності «живих» зразків при високій роздільній здатності. Електронні мікроскопи мають таку ж роздільну здатність, проте є несумісними з «живими» зразками. Роздільна здатність NSOM дозволяє досліджувати «живі зразки», проте, на відміну від

STED, такі дослідження обмежені лише поверхнею зразка.

Двофотонний лазерний мікроскоп – дозволяє спостерігати «живі» зразки на глибині > 1 мм, використовуючи явище флуоресценції. Двофотонний мікроскоп є різновидом п-фотонного флуоресцентного мікроскопа. Його переваги в порівнянні з конфокальним мікроскопом: велика проникаюча здатність, низький ступінь фототоксичності.

Скануючі зондові наноскопи.

Ці наноскопи в загальному випадку призначені для отримання тривимірного зображення поверхні зразка з високою роздільною здатністю, використовуються практично у всіх областях науки і техніки (зокрема, біології, хімії, фізиці, міждисциплінарних дослідженнях, електроніці, нанотехнології і т.д.). Основними структурними елементами цих наноскопів є зонд, система переміщення зонда відносно зразка за двома або трьома координатами, система реєстрації (фіксує значення функції відстані «зонд – поверхня зразка»).

За конструкціями основних структурних елементів виділяють два основні типи наноскопів: атомно-силовий (AFM – Atomic-Force Microscope) і тунельний (STM – Scanning Tunneling Microscope).

AFM реєструє силову взаємодію «зонд – поверхня зразка» (суперпозиція сил: Ван-дер-Ваальса пружних сил, сил адгезії, магнітних і електростатичних сил). Як зонд використовують кантилівер – нанорозмірне вістря, розміщене на кінці гнучкої балки, яка закріплена на масивній основі. Важливою проблемою практичного використання кантилівера є нелінійність залежностей властивостей кантилівера від його розмірів, що означає чутливість до зміни параметрів процесу вимірювання. Контроль залишкової деформації також є складним. В залежності від характеру дії сили між кантилівером і поверхнею зразка виділяють три основні режими роботи AFM: контактний (вістря кантилівера торкається поверхні зразка), напівконтактний (вістря мети коливається, торкаючись поверхні зразка), безконтактний (вістря мети не торкається поверхні зразка). Режим обирається в залежності від задачі вимірювання. Роздільна

здатність AFM складає: $0,1$ – нм за осями x та y ; $0,01$ нм вздовж осі z .

STM призначений для отримання зображення поверхонь електропровідних зразків. Як зонд в STM використовується гостра металева голка. При подачі на голку відносно невеликого потенціалу (< 10 В) виникає тунельний струм (1 – 1000 пА), значення якого експоненціально залежить від відстані «зонд – поверхня зразка». Усі STM можна розділити на дві групи за умовами роботи: ті, що працюють у повітрі (або іншому середовищі), та ті, що працюють в умовах надвисокого вакууму. Роздільна здатність STM складає: $0,1$ – 1 нм за осями x та y ; $0,1$ нм за віссю z .

Наноскопи, які опромінюють зразок зарядженими частинками.

Названі прилади, дають змогу отримувати зображення з максимальним збільшенням до 10^6 разів завдяки використанню потоку електронів або іонів з великими енергіями замість світлового потоку. Для одержання зображення використовуються спеціальні магнітні лінзи, які керують рухом заряджених часток в колоні мікроскопа за допомогою магнітного поля. Виділяють трансмісійні (потік заряджених частинок фокусується на екрані або пластині після проходження крізь зразок) та скануючі (тонкий сфокусований пучок заряджених частинок розгортається по поверхні зразка) мікроскопи.

До трансмісійних мікроскопів належать просвічуючий електронний мікроскоп (ТЕМ – Transmission Electron Microscope) та просвічуючий растровий електронний мікроскоп (STEM – Scanning Transmission Electron Microscope).

ТЕМ – мікроскоп, в якому зображення зразка (товщина зразка не має перевищувати 1 мкм) формується в результаті взаємодії потоку електронів з речовиною зразка з наступним збільшенням магнітними лінзами і реєстрацією на флуоресцентному екрані (фотоплівці, сенсорному пристрої з зарядовим зв'язком).

STEM – тип ТЕМ, який відрізняється тим, що електронний пучок фокусується в одну точку, яка зміщується по зразку за растром.

До скануючих мікроскопів належать растрові електронні (SEM – Scanning Electron Microscope), відображаючі електронні і скануючі гелій-іонні мікроскопи (НІМ – Helium Ion Microscope).

SEM призначений для отримання зображення поверхні зразка з високою роздільною здатністю ($\sim 0,1\text{нм}$), а також інформації про склад, будову поверхневих та при поверхневих шарів.

Основними елементами SEM є електронні пушка і колона, функція якої полягає у формуванні гостросфокусованого електронного зонда середніх енергій ($<50\text{кэВ}$) на поверхні зразка. Прилад обов'язково повинен бути оснащений вакуумною системою. Також в кожному SEM є предметний столик, який дає змогу переміщати зразок у трьох напрямках щонайменш.

При взаємодії електронів зі зразком виникають кілька видів сигналів, кожен з яких уловлюється спеціальним детектором. Відповідно зображення, сформовані мікроскопом, можуть бути побудовані з використанням різних сигналів одночасно. SEM оснащуються детекторами, що відбирають і аналізують випромінювання яке виникло в процесі взаємодії та частинки що змінили енергію в результаті взаємодії електронного зонда із зразком. SEM застосовуються як дослідницький інструмент фізиці, електроніці, біології, фармацевтиці, медицині, матеріалознавстві і т.д. Їх головна функція – отримання збільшеного зображення досліджуваного зразка і зображень зразка в різних сигналах. Зіставлення зображень, отриманих в різних сигналах, дозволяють робити висновок про морфологію та склад поверхні.

Відображаючий електронний мікроскоп застосовується для виявлення поверхневої структури під час дослідження великих за розміром зразків. У цьому мікроскопі контраст виникає при реєстрації відображених електронів (зворотно-розсіяних та вторинних) і пов'язаний, в основному, з кутом падіння електронів на зразок (інтенсивність зворотного розсіювання та глибина, на якій воно відбувається залежить від енергії пучка електронів).

НІМ – мікроскоп за принципом роботи аналогічний SEM, але замість пучка електронів використовується пучок іонів гелію. В результаті взаємодії прискорених іонів з речовиною кінетична енергія іонів передається електронам і атомам зразка. При цьому деякі з електронів речовини вилітають у вакуум (вторинні електрони). Частина іонів гелію відбивається від атомів речовини назад. Крім цього, деякі атоми речовини можуть бути вибитими налітаючими іонами, що призводить до розпилення зразка. Імпульс налітаючих іонів занадто малий для ефективного збудження глибинних рівнів атомів, тому рентгенівське випромінювання в НІМ не спостерігається. НІМ зазвичай укомплектовані двома детекторами: детектором Еверхарта-Торнлі (для реєстрації вторинних електронів) та мікροканальною пластиною (для реєстрації відбитих іонів). Для компенсації позитивного електричного заряду, який накопичується на поверхні діелектричних зразків, використовують розфокусований електронний пучок. НІМ використовуються для мікроскопії поверхні зразків, розпилення іонним пучком, іонної літографії.

Наноскопи, як засоби вимірювання лінійних розмірів.

Практично єдиними приладами, які на сьогодні можуть мати промислове використання, є SEM. Зокрема, застосовуються для отримання зображень поверхонь мікросхем або проміжної стадії фотолітографічного процесу. Технічні та економічні характеристики мікроскопів при вимірюванні геометричних параметрів матеріального об'єкта визначаються їх конструкцією. Зокрема, геометричними характеристиками електронного зонда: розмір (діаметр) сфокусованого пучка електронів, кути його збіжності, розбіжності та глибина фокусування. Ця інформація важлива при використанні мікроскопів у наукових дослідках та промисловості, особливо у зв'язку з розробкою нових методів вимірювання лінійних розмірів рельєфних мікро- і нанометрових елементів поверхні твердих тіл з нанометровою точністю.

На сьогодні в Україні SEM як засоби вимірювання геометричних параметрів

представлені приладом РЭМ-106И. Він являє собою вимірювальний прилад для автоматизованих вимірювань лінійних розмірів мікрорельєфу поверхні в діапазоні лінійних вимірювань від 5 мкм до 200 нм [1].

SEM як засіб вимірювання лінійних розмірів нанорозмірних об'єктів

Інформаційно-вимірювальна система SEM.

Взаємодії електронного зонда SEM з речовиною в кожній точці поверхні зразка спричинює ряд фізичних явищ, які реєструються відповідними детекторами. Вихідні сигнали детекторів SEM підлягають первинній обробці (виділення корисного сигналу на фоні завад), яка виконується аналоговою частиною вимірювального каналу – зазвичай, підсилювачем та фільтром нижніх частот. Виконується аналого-цифрове перетворення після якого реалізується вторинна обробка (виділення інформативних параметрів) пристроєм, який зазвичай побудований з використанням мікроконтролерів. В загальному вигляді рівняння вимірювання SEM можна записати так:

$$Y = K_{Di} \cdot K_{MChi} \cdot X,$$

де Y – значення вимірюваної фізичної величини; K_{Di} – коефіцієнт перетворення i -го детектора; K_{MChi} – коефіцієнт перетворення i -го вимірювального каналу; X – вхідна фізична величина.

Для досягнення найвищої точності вимірювання заданої фізичної величини SEM проводиться третинна обробка – сумісна обробка сигналів вимірювальної інформації вимірювальних каналів детекторів, які реєструють різні фізичні явища. Детектори, вимірювальні канали та пристрій третинної обробки утворюють інформаційно-вимірювальну систему SEM. Пристрій третинної обробки зазвичай реалізує алгоритми цифрової обробки зображень. Обробка зображень виконується, або в просторовій, або в області просторових частот. Широко використовуються перетворення Фур'є, Габора, wavelet-перетворення. Обробка виконується з метою підготовки до подальшого суміщення та суміщення зображень, отриманих з використанням різних детекторів.

Таким чином, SEM, завдяки використанню різні типи сигналів, можуть вимірювати кількісні характеристики та визначати властивості та стани зразка одночасно. Так, із застосуванням вторинних електронів вимірюються геометричні параметри зразка. Якщо використовуються інші сигнали, визначаються характеристики зразка, розподілені у просторі, описаному виміряними геометричними параметрами. За допомогою спеціального програмного забезпечення виходячи з отриманої вимірювальної інформації визначаються властивості та стани зразка. Загальна структура SEM призначеного для вимірювань лінійних розмірів наведена на рис. 1.

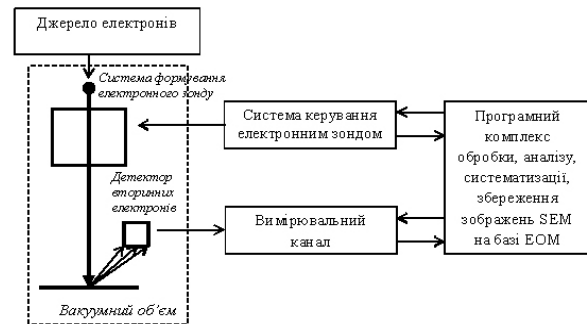


Рис. 1. Загальна структура SEM

Такі можливості роблять SEM найперспективнішим засобом вимірювань у нанометровому діапазоні.

Джерела похибок при вимірюванні SEM геометричних параметрів.

В SEM реєструються слабкі сигнали, що є складним технічним завданням. Традиційно найбільшу інструментальну похибку вносить первинний вимірювальний перетворювач – детектор. В SEM використовується детектор катодної люмінесценції, приймачем рентгенівського випромінювання зазвичай слугує сцинтиляційний детектор та енергодисперсійні детектори. Для реєстрації вторинних та відбитих електронів використовують сцинтиляційні та напівпровідникові детектори.

При вимірюванні геометричних параметрів зразка значною також є методична похибка обумовлена:

нелінійністю відносно геометричних параметрів досліджуваних структур і SEM,

формуванням сигналу SEM, який працює в режимі збору пружно відбитих електронів;

рельєфною структурою досліджуваної поверхні твердого тіла;

генерацією вторинних повільних електронів, обумовленою емісією електронів з поверхневих станів під дією первинних електронів, які перетинають поверхню за напрямком з вакууму в тверде тіло – ефект «струшування» поверхневих електронів.

Суб'єктивні похибки при вимірюванні SEM обумовлені особливостями формування і представлення сформованого зображення на пристрої відображення. Так, наприклад, для визначення діаметру деякої частинки оператор самостійно «на око» визначає її межі, що має відображення у результатах вимірювань.

Методи та засоби оцінювання характеристик точності мікроскоп SEM

SEM не є транспортабельними засобами вимірювання і потребують калібрування на місці використання. Таке калібрування проводиться за допомогою еталонних зразків – лінійних мір малої довжини.

Засоби оцінювання характеристик точності SEM при вимірюванні лінійних розмірів за координатними осями x та y .

Виходячи з конструктивних можливостей SEM, основним засобом для визначення характеристик точності є стандартний зразок. Стандартні зразки класифікують за профілем рельєфу їх елементів [2].

У структури з прямокутним профілем рельєфу поверхні кут φ нахилу бокових стінок відносно нормалі до верхніх задовольняє умову

$$\varphi < \frac{\varphi_d}{2},$$

де φ_d – кут збіжності-розбіжності електронного зонда растрового електронного мікроскопа. Враховуючи значення кута збіжності-розбіжності сучасних зондів растрових електронних мікроскопів, прямокутними вважаються структури з кутами нахилу бокових стінок $\varphi < 0,04^\circ$, а трапецієподібними – з кутами $\varphi > 0,04^\circ$. Таким чином, для SEM практично всі структури, отримані за допомогою мікро- і нанотехнологій, що використовують-

ся в промисловості, є трапецієпо-дібними. Прямокутні структури створюють з використанням спеціальних технологій і застосовуються тільки як стандартні зразки.

На сьогодні існує два види прямокутних структур. У структурах першого виду прямокутний рельєф отримують за технологією анізотропного травлення монокремнію. Інший вид – рельєфні прямокутні структури, які являють собою щілиновидні канавки в кремнії з прямокутним профілем та відомою (з високою точністю) відстанню між протилежними стінками. Рельєфні прямокутні структури, об'єднані по декілька структур різної ширини в один стандартний зразок, застосовуються для калібрування збільшення SEM і вимірювання діаметра його електронного зонда [3].

Для структури з трапецієподібним профілем і малими кутами нахилу бокових стінок

$$\varphi > \frac{\varphi_d}{2}$$

та

$$\varphi = \arctg\left(\frac{s}{h}\right) < \arctg\left(\frac{d}{h}\right),$$

де s – проекція бокової нахиленої стінки, h – висота рельєфу; d – ефективний діаметр електронного зонда.

Стандартні зразки з малими кутами нахилу бокових стінок застосовують для калібрування збільшення растрових електронних мікроскопів. Структури з трапецієподібним профілем і великими кутами нахилу бокових стінок мають задовольняти умову

$$s = h \operatorname{ctg} \varphi \gg d.$$

Стандартні зразки з трапецієподібним рельєфом профілю і від'ємними кутами нахилу бокових стінок зустрічаються доволі часто, але на сьогодні відсутні методи калібрування SEM за допомогою таких структур. Існують також інші стандартні зразки з більш складним рельєфом поверхні, які використовуються в інших методах перевірки, наприклад, фотограмметричному методі. В таблиці наведено параметри деяких мір, які застосовуються для калібрування SEM, та параметри SEM, які можна визначити з їх використанням [2].

1. Параметри деяких мір, які використовуються для калібрування SEM

Міра	НІ-1000 (Японія)	SRM-2090 (США)	BCR_97A/G-7 (Німечина)	МШПС-2,0К (Росія)		
Метод атестації міри	Дифракція	Інтерференція				
Параметр міри, що атестується	Період	Крок		Крок	Ширина лінії	Висота рельєфа
Номінальне значення, нм	240	200	400	2000	10-1500	100..1500
Параметр SEM, що калібрується	Збільшення			Збільшення, лінійність шкал, діаметр зонда		

Методики оцінювання характеристик точності SEM як засобу вимірювання лінійних розмірів та вимоги до них.

На сьогодні існує методика калібрування SEM, визначена міждержавним стандартом ГОСТ Р 8.636-2007. Згідно зі стандартом встановлено методику калібрування SEM, які працюють в діапазоні від 1 нм до 1 мкм, з використанням рельєфних мір, виготовлених за ГОСТ Р 8.628-2007 та перевірених за ГОСТ Р 8.629-2007.

За стандартом метрологічними характеристиками визначено масштабний коефіцієнт відеозображення SEM m та ефективний діаметр електронного зонда d .

Масштабний коефіцієнт відеозображення – це відношення довжини досліджуваного елемента рельєфу на об'єкті вимірювання до числа пікселів цього елемента на відеозображенні; визначається для кожного SEM.

Ефективний діаметр електронного зонда – це значення величини, яка характеризує поперечний розмір електронного зонда, що експериментально визначається шляхом обробки кривої відеосигналу в режимі реєстрації повільних вторинних електронів у рамках вибраної моделі взаємодії зонда з речовиною.

Незважаючи на наявність стандарту розробляються інші методи калібрування, наприклад, калібрування на основі фотограмметричного методу з використанням складних тривимірних стандартних зразків.

Основними вимогами до методів та засобів визначення метрологічних характеристик SEM є: можливість визначення без розбору збору мікроскопа, можливість визначення на місці використання (без транспортування), можливість швидкого визначення (в межах 10 min).

Висновки

Сучасний наноскоп в загальному випадку можна розглядати як об'єктно-орієнтовану інформаційно-вимірювальну систему, яка містить апаратну і програмну частини. Апаратна частина виконує функцію збору експериментальних даних, програмна частина – функції вилучення та мінімізації похибок із використанням методів і алгоритмів цифрової обробки сигналів.

Методи і алгоритми вилучення та мінімізації похибок є унікальними при вирішенні кожної задачі. Єдині підходи на сьогодні ще не сформовані.

При розробці методологічного та метрологічного забезпечення наноскопії необхідно враховувати той факт, що загальноприйняті моделі (в тому числі й розглянуті у статті) зразків, матеріальних об'єктів та перетворень орієнтовані на представлення однорідних неперервних твердих тіл, обмежених ідеальними неактивними поверхнями, і тих, які піддаються макроскопічним взаємодіям. Проте в наномасштабі виникає потреба в моделях неоднорідних об'єктів з розмитими межами недетермінованими перетвореннями.

Таким чином, експериментальні дані у вигляді результатів вимірювання, отримані з використанням наноскопів, обов'язково мають бути доповнені оцінками невизначеності. Цей факт відкриває перспективи досліджень у напрямі розробки якісного метрологічного забезпечення, що дасть змогу окреслити зв'язок між передачею і візуалізацією даних у поняттях теорії інформації і теорії вимірювання.

Список використаної літератури

1. Неежмаков, К. П. Перспективы развития нанометрологии в Украине с использованием растровых электронных микроскопов / К. П. Неежмаков // Системы обработки інформації. – 2011. – № 6(96) – С. 181–184.

2. Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазонов для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии / Ю. А. Новиков, Ю. В. Озерин, Ю. И. Плотников, А. В. Раков, П. А. Тодуа // Труды ин-та общей физики им. А. М. Прохорова. – 2006. – Т. 62. – С. 36–76.

3. Проблемы измерения геометрических характеристик электронного зонда растрового электронного микроскопа / Ч. П. Волк, Е. С. Горнев, Ю. А. Новиков, Ю. И. Плотников, А. В. Раков, П. А. Тодуа // Труды ин-та общей физики им. А. М. Прохорова. – 2006. – Т. 62 – С. 77–120.

Отримано 28.09.2012

References

1. Nyezhamkov, K. Development of nanometrology in Ukraine using of scanning electron microscopes / K. Nyezhamkov // Information processing systems. – 2011. – № 6(96) – P.181–184 [in Ukrainian].

2. Linear measure micrometers and nanometer ranges rovogo distributeon centers for electronic and atomic force micro-scopy / Y. Novikov, Y. Ozerin, Y. Plotnikov, A. Rakov, P. Todua // Works of A. Prokhorov institute of general physics. – 2006. – V.62 –P. 36–76 [in Russian].

3. Problems of geometric characteristics of the scanning electron microscope electron beam measuring /C. Volk, H. Gornev, Y. Novikov, Y. Plotnikov, A. Rakov, P. Todua // Works of A. Prokhorov institute of general physics.– 2006.– V.62. –P.77–120 [in Russian].



Шантир Діана Сергіївна,
к.т.н, доц. каф. Автоматизації експеримент. досліджень Нац. техн. ун-ту України «Київський політехн. інститут».
Тел.: +38-095-577-59-23
E-mail: shantyr@meta.ua



Шантир Антон Сергійович,
аспірант Нац. техн. ун-ту України «Київський політехн. інститут».
Тел.: +38-050-837-39-59