

[0000-0002-6525-9721] **В. П. Квасніков**, д.т.н., професор,

[0000-0002-1586-1861] **М. О. Катаєва**, к.т.н.

e-mail: kataeva.mariia@gmail.com

Національний авіаційний університет
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна

АНАЛІЗ І КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ РЕЛЬЄФУ НАНООБ'ЄКТІВ

У статті проведено аналіз наявних методів та засобів вимірювання рельєфу нанооб'єктів і розроблено їх класифікацію на основі принципів використання. Розглянуто основні інформаційні параметри, на яких базується кожний описаний метод, та визначено умови їх найбільш ефективного застосування для вирішення задач вимірювання рельєфу нанооб'єктів. На основі проведеного аналізу було встановлено, що найбільш функціональним та універсальним при вирішенні широкого кола проблем є метод скануючої зондової мікроскопії. Розроблено класифікацію наявних методів скануючої зондової мікроскопії залежно від характеру їх застосування. Доведено, що збільшення кількості методів вимірювання, що використовуються при метрологічному аналізі нанооб'єктів, збільшить надійність і точність результатів вимірювань, і кожний метод забезпечить додаткові інформаційні параметри. Рекомендовано для підвищення точності нановимірювань використовувати методика, побудовані за принципом інтеграції інформації, наданої різними методами.

Ключові слова: нанотехнології, нановимірювання, метрологія, методи та засоби вимірювання, наноматеріали.

Вступ. В останні роки дослідження субмікронних, нано- та кластерних матеріалів отримало швидкий розвиток у багатьох галузях науки та техніки. Протягом кількох десятиків років практично в усіх розвинених країнах світу в різних галузях народного господарства спостерігається стрімкий прогрес у сфері нанотехнологій.

Підвищення ефективності виробництва і якості виробів, розвиток електронної техніки і біомедичних приладів, а також створення нових наноструктурованих матеріалів з особливими властивостями значною мірою визначаються точністю та прецизійністю метрологічного забезпечення.

Варто зазначити, що дослідження, спрямовані на вдосконалення інструментального забезпечення нанотехнологій, вийшли на новий прогресивний рівень. Безумовно, масштабний розвиток наноіндустрії неможливий без відповідного метрологічного забезпечення (МЗ). У зв'язку з цим актуальною є проблема удосконалення наявних і розробки нових методів вимірювання й оцінювання фізико-механічних властивостей нанооб'єктів. На особливу увагу заслуговує проблема вимірювання параметрів рельєфу нанооб'єктів, адже, спираючись на попередні дослідження вітчиз-

няних і закордонних вчених [1-7] в цій галузі, можна стверджувати, що досі не існує універсальної методики, яка б враховувала всі зовнішні дестабілізуючі фактори та специфічні властивості наноматеріалів.

Мета дослідження. Метою роботи є ґрунтовний аналіз наявних методів і засобів проведення вимірювань рельєфу нанооб'єктів, їх класифікація та визначення основних характеристик, що буде слугувати основою для удосконалення наявних і створення нових методів та методик вимірювання рельєфу нанооб'єктів.

Постановка проблеми. Суть нановимірювань полягає в тому, щоб працювати на молекулярному рівні для дослідження структур з принципово новими властивостями. Одна з основних проблем при роботі з нанооб'єктами та наноструктурами пов'язана з наднизькими рівнями сигналу. Іншою проблемою є широкий діапазон поведінки, яку можуть проявляти вимірювальні об'єкти і компоненти.

Наприклад [8], вимірювальні нанооб'єкти з полімерних матеріалів можуть мати опір понад 1 ГОм. Однак, будучи втягнутим у волокна діаметром менше 100 нм і легованими різними наночастинками, полімер може

перетворитися з чудового ізолятора на високопровідний дріт. Результат – надзвичайно широкий діапазон тестових сигналів. Для виявлення слабких електричних сигналів у нижній частині діапазону потрібні високочутливі інструменти з високою роздільною здатністю.

Також важливим аспектом є те, що для вимірювань постійного струму може знадобитися характеристика деяких пристроїв і структур радіочастотними сигналами [9-11]. Це вимагає суворого проектування засобів вимірювання з надійними ВЧ-з'єднаннями з малими втратами вимірювальної голівки і спеціальною електронною схемою для кожного окремого шляху проходження сигналу. В іншому

випадку буде неможливо досягти розділення, необхідного для прецизійних нановимірювань.

Отже, методи й інструменти вимірювання повинні звести до мінімуму шум та інші джерела похибок, які можуть перешкодити сигналу, та враховувати специфічні особливості наноматеріалів.

Не менш важливим фактором є те, що метрологічні засоби нановимірювань повинні бути простими у використанні та економічними.

Виклад основного матеріалу. В таблиці 1 наведено класифікацію найбільш вживаних методів вимірювання рельєфу наноб'єктів та їх основні характеристики.

Таблиця 1 – Класифікація основних методів вимірювання наноб'єктів

№	Найменування	Загальні характеристики
1. Скануюча тунельна мікроскопія (СТМ)		
1.4.	Метод I (z) спектроскопії	Вимірює тунельний струм залежно від відстані між зондом та зразком у кожній точці СТМ-зображення
1.5.	Метод I (v) спектроскопії	Передбачає одночасне отримання зображення рельєфу при фіксованих значеннях струму I_0 і напруги зсуву V_0
2. Контактна скануюча атомно-силова мікроскопія (Касма)		
2.1.	Метод постійної сили	Вимірювання рельєфу поверхні при скануванні зразка зондом, який перебуває з ним у безпосередньому контакті, водночас система зворотного зв'язку підтримує постійну силу тиску зонда до поверхні
2.2.	Метод постійної висоти	Вимірювання рельєфу поверхні при скануванні зразка зондом, який перебуває з ним у безпосередньому контакті, водночас система зворотного зв'язку розімкнута і z-координата сканера лишається постійною
3. Переривчасто-контактна скануюча силова мікроскопія		
3.1.	Переривчасто-контактний метод	Вимірювання рельєфу поверхні з використанням коливальної та резонансної частоти зонда
3.3.	Метод відображення фази	Дослідження рельєфу, поверхневої адгезії і в'язко-пружності, що визначають фазову затримку коливань зонда
4. Безконтактна атомно-силова мікроскопія (Non Contact AFM)		
4.1.	Безконтактний метод АСМ	Вимірювання рельєфу поверхні за допомогою коливальної та резонансної частоти зонда. У процесі сканування вістря зонда не торкається поверхні зразка, а зворотний зв'язок підтримує постійну амплітуду коливання зонда

Складено за: [12, 13]

Нині найбільшого поширення у забезпеченні метрологічних робіт в нанометровому діапазоні набули растрова електронна мікроскопія (РЕМ), просвітчаста електронна мікроскопія (ПЕМ), атомно-силова мікроскопія (АСМ), скануюча тунельна мікроскопія (СТМ), мікроскопія на основі сфокусованих

іонних пучків, вторинна іонна мас-спектрометрія, Оже-спектроскопія та ін.

З точки зору дослідження рельєфу і фізичних властивостей структур з високим латеральним розділенням (менше 10 нм), однією з найбільш перспективних є скануюча зондова мікроскопія (СЗМ).

Розмір і структура нанооб'єкта мають великий вплив на тип методики та характеристики методів вимірювання рельєфу нанооб'єктів.

Доведено, що для дослідження рельєфу макроскопічних матеріалів найбільш придатними є оптичні мікроскопи, для наноскопічних матеріалів з розміром частинок, меншим 200 нм, краще використовувати СТМ, АСМ або комбіновані методи скануючої зондової мікроскопії.

У таблиці 2 наведено відносні розміри частинок, що розглядаються як наноскопічні, мезоскопічні та макроскопічні.

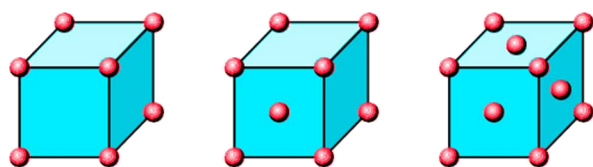
Таблиця 2 – Відносні розміри різних класифікацій частинок

Класифікація	Розмір вимірювального об'єкта
Макроскопічний рівень	> 300 нм
Мезоскопічний рівень	Залежить від довжини фазової когерентності
Наноскопічний рівень	0,5-200 нм
Атомний рівень	< 0,5 нм

Складено за: [14, 15]

Методи СЗМ, СТМ, АСМ особливо корисні для визначення топографії структур кристалічних наночастинок [4, 8]. На рисунку 1 зображено атомні структури для деяких типових кристалів добре відомих форм, таких як простий куб, об'ємно-центрований куб та граніцентований куб. Знання розташування атомів у цих структурах допомагає передбачити властивості частинок.

Однак у наноскопічному масштабі саме розмір частинки докорінно змінює фізику її поведінки і диктує необхідність використання інших методів вимірювання.



- а) проста кубічна структура,
б) об'ємно-центрована кубічна структура,
в) граніцентована кубічна структура

Рисунок 1 – Загальні кристалічні атомні структури

Важливим є той факт, що хімічні й електричні набори властивостей наноматеріалу можуть змінюватися при зменшенні розмірів частинок до нанометрового розміру. Тому на практиці для визначення характеристик рельєфу більшості з цих матеріалів потрібні додаткові хімічні й електричні випробування, що також впливає на вибір методу вимірювання.

Залежно від засобів вимірювання методи аналізу наноматеріалів можна умовно поділити на дві основні групи: дискретні та ансамблеві методи вимірювання.

У дискретних методах, таких як скануюча електронна мікроскопія (СЕМ), просвітчаста електронна мікроскопія (ПЕМ), електронна мікроскопія (ЕМ), атомно-силова мікроскопія (АСМ) та скануюча зондова мікроскопія (СЗМ), зазвичай використовуються потужні мікроскопи. ЕМ та СЗМ є доволі простими методами і відображають форми частинок, але є недостатніми з точки зору статистики та отримання повної характеристики топографії поверхні [1].

На рисунку 2 наведено порівняння дискретних методів нановимірювань щодо показників швидкості отримання результатів і ціни.

Ці методи мають значно більшу роздільну здатність, ніж оптична мікроскопія, і здатні виявляти та вимірювати дискретні частинки шляхом розсіювання пучка електронів високої енергії (СЕМ та ПЕМ) або шляхом детектування через зонд, прикріплений до злегка підресореної консолі (АСМ).

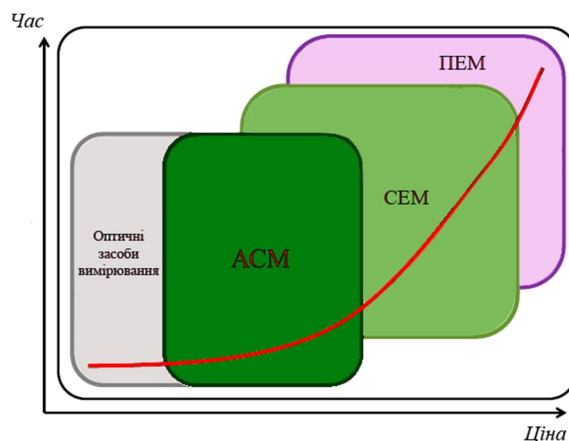


Рисунок 2 – Порівняння дискретних методів нановимірювань

Ансамблеві методи, як правило, є непрямыми методами, коли інформація з багатьох наночастинок отримується одночасно. Методи цієї групи дають змогу встановити середній розмір наночастинок як малокутове розсіювання рентгенівських променів (SAXS) та виявити інтерференцію фотонів.

Доведено, що найбільш поширеним і зручним для користувача методом визначення розміру та рельєфу нанооб'єктів цієї групи є метод динамічного розсіяння світла (ДРС), який ґрунтується на принципах когерентності світлових хвиль, а метрологічні характеристики отримуються шляхом визначення різниці

фаз цих хвиль після взаємодії з наночастинами [2, 16].

Одним із методів, який потенційно поєднує в собі переваги групи дискретних та ансамблевих методів, є метод відстеження наночастинок, який полягає у визначенні положення частинок, зважених у рідині, за допомогою виявлення світла, яке вони розсіюють при опроміненні джерелом лазера, та перегляду суспензії за допомогою камери із зарядженим сполученим пристроєм.

На рисунку 3 зображено співвідношення основних методів дослідження наноматеріалів з різними характеристиками рельєфу нанооб'єктів.

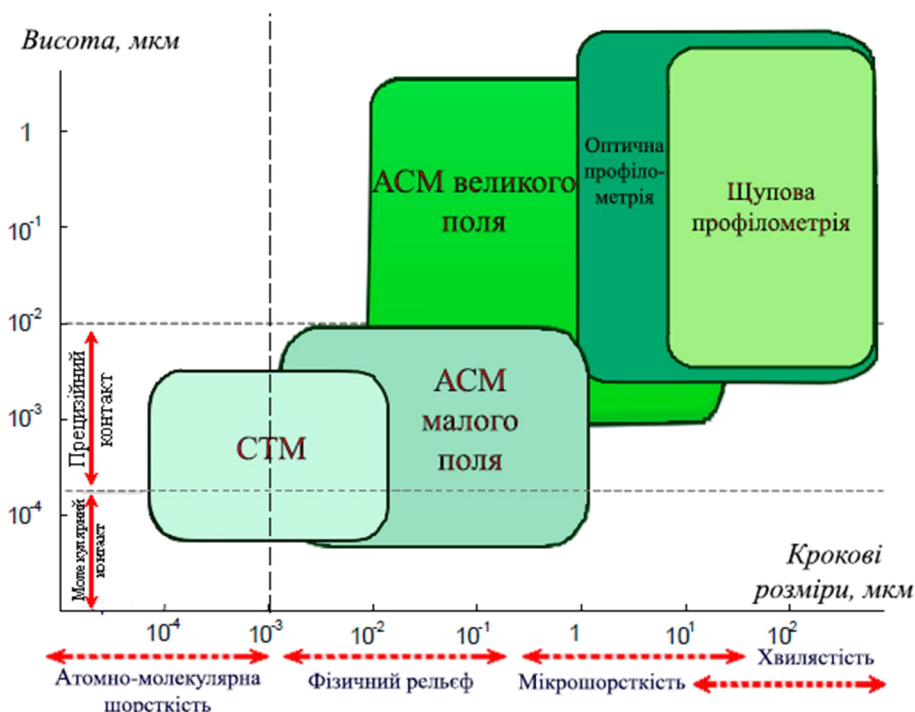


Рисунок 3 – Співвідношення основних методів дослідження наноматеріалів з різними показниками рельєфу нанооб'єктів

На основі проведеного аналізу було визначено, що найбільш функціональними та універсальними у вирішенні досить широкого спектра задач, пов'язаних із визначенням параметрів рельєфу нанооб'єктів, є метод скануючої зондової мікроскопії. СЗМ охоплює низку різноманітних експериментальних методів з вивчення структури і властивостей поверхні як на мікрорівні, так і на рівні окремих молекул та атомів [3, 4].

Безперечною перевагою цього методу є той факт, що за допомогою СЗМ можна отримати вимірювальну інформацію відразу з відносно великої ділянки поверхні, що дає можливість використовувати цей метод в он-лайн-режимі. Тому не дивно, що нині вони широко використовуються для дослідження, діагностики та модифікації поверхонь.

Спільною рисою для всіх методів є наявність загостреного зонда як інструменту

роботи з поверхнею зразків. Існують контактні, напівконтактні і безконтактні режими роботи, а також низка режимів роботи, серед яких: тунельний режим, атомно-силовий режим, режим спектроскопії, метод зонда Кельвіна, режими електросилової, магнітно-силової, ближньопільної, оптичної, конфокальної мікроскопії та ін. [17]. За допомогою цих методів можна вимірювати не

тільки топологію структури, але й безліч спеціальних властивостей, таких як модулі пружності, розподіл різних речовин по поверхні, ступінь шорсткості поверхні, розподіл статичного заряду, орієнтація магнітних доменів тощо [7].

Виходячи з характеру застосувань наявних методів у СЗМ, їх можна класифікувати наступним чином (рисунок 4).

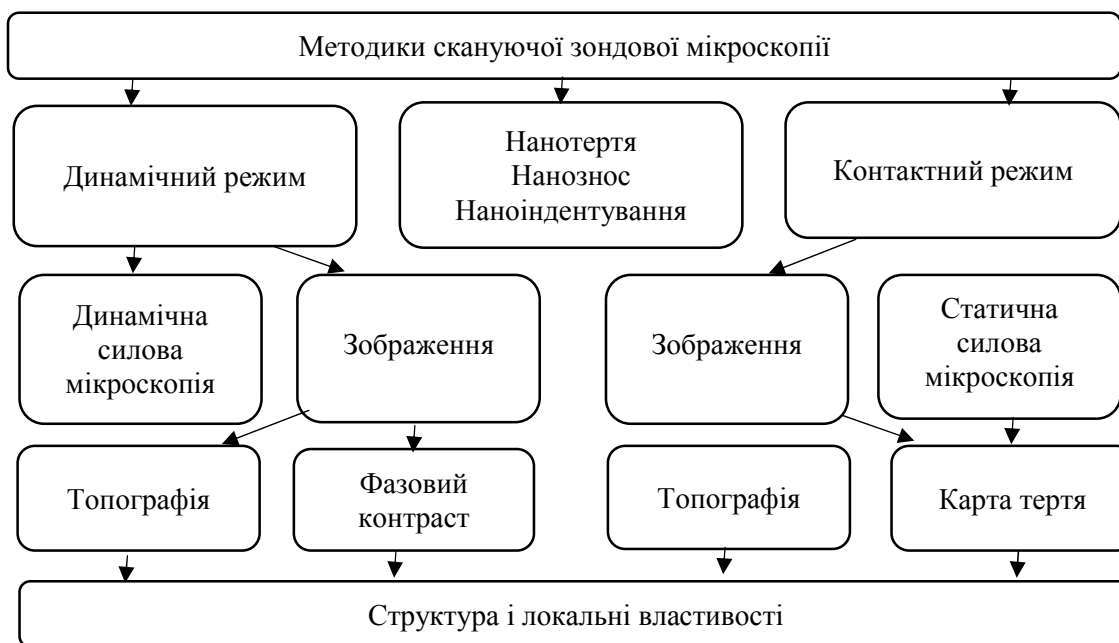


Рисунок 4 – Методи скануючої зондової мікроскопії при пружному і непружному впливі зонда

Незважаючи на різноманіття видів і застосувань сучасних скануючих мікроскопів, в основі їх роботи закладені схожі принципи, а їх конструкції мало різняться між собою.

Ще одною спільною рисою, яка об'єднує не тільки інструменти зондування, а й інші представлені у статті засоби вимірювальної техніки для вимірювання у нанометровому діапазоні, є їх підвищена чутливість до впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів, таких як склад і властивості навколишнього середовища, освітлення, різниця потенціалів і магнітного поля, температурний режим тощо.

Оскільки властивості певних наноматеріалів відмінні від звичайних, вплив дестабілізуючих факторів на результати вимірювання може бути абсолютно непередбачуваним.

Тому при виборі наявного або розробці нового методу вимірювання треба доскональ-

но вивчити особливості кінетики і механізму процесів взаємодії вимірювального наноб'єкта з навколишнім середовищем, визначити властивості наноструктур, параметри процесів і модель їх математичного опису.

Обговорення результатів. Необхідною умовою для вибору умов вимірювання, проведення таких оцінювань і подальшої інтерпретації даних є відтворюваність отриманих результатів і незмінність зразка за комплексом властивостей.

При зміні розмірів можуть змінюватися не тільки значення визначених величин, а й сам характер їх залежностей від властивостей, середовищ і впливів.

Визначено основні напрями створення і використання методів вимірювання мікро- та наносистем:

- створення модельних уявлень зв'язків топологічних характеристик і реакції об'єкта на зовнішні впливи;

- встановлення зв'язків між властивостями елемента або системи і топологією складу, структури, зарядів і полів;

- встановлення зв'язків між технологічними факторами, кінетикою утворення і властивостями наноструктур;

- створення моделей, що пов'язують функціональні параметри пристроїв з властивостями структур, які визначаються при їх виготовленні.

Для спрощення процесу вибору методів нановимірювань розроблено методику виявлення відхилень внаслідок впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів:

$$\omega(t) = \omega_1 e^{\gamma t^a} + \omega_0, \quad (1)$$

де ω_1 – параметр виявлення відхилень нановимірювань у першому підінтервалі часу вимірювання; γ – коефіцієнт, який залежить від кількості вимірювальних операцій; a – коефіцієнт, який залежить від жорсткості впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів; t – час проведення вимірювань; ω_0 – усталене значення параметра інтенсивності виявлення відхилень.

Параметри γ і a кривої, що описується формулою (1), визначаються подвійним логарифмуванням функції $\omega(t)$ для двох підінтервалів часу (на перших етапах проведення вимірювання значенням ω_0 можна знехтувати):

$$\ln \ln \frac{\omega(t_2)}{\omega_1} = -\ln \gamma - \alpha \ln t_2, \quad (2)$$

$$\ln \ln \frac{\omega(t_3)}{\omega_1} = -\ln \gamma - \alpha \ln t_3. \quad (3)$$

Із рівнянь (2) і (3) отримуємо

$$\alpha = \frac{\left(\ln \ln \frac{\omega(t_2)}{\omega_1} - \ln \ln \frac{\omega(t_3)}{\omega_1} \right)}{(\ln t_3 - \ln t_2)},$$

$$\ln \gamma = \left[\frac{\left(\ln \ln \frac{\omega(t_2)}{\omega_1} - \ln \ln \frac{\omega(t_3)}{\omega_1} \right)}{(\ln t_3 - \ln t_2) + \ln \ln \frac{\omega(t_2)}{\omega_1}} \right].$$

Параметр потоку $\omega(t)$ можна представити у наступному вигляді:

$$\omega(t) = \sum_{i=1}^k a_t \omega_{1,i} e^{-\gamma t^{a_i}} + \omega_0,$$

де k – кількість груп метрологічних параметрів, де спостерігаються певні відхилення; a_t – ваговий коефіцієнт i -ї групи параметрів.

Представленою залежністю можна описати прояв усіх видів відхилень нановимірювань. Отримані вирази є універсальними для опису потоку виявлених відхилень наноб'єктів різної конфігурації. Відмінні умови проведення вимірювання визначатимуться тільки за рахунок значень коефіцієнтів γ і a .

Стандартне відхилення випадкової величини при визначенні топології поверхні наноб'єкта можна розрахувати на основі першого центрального моменту

$$\sigma_1 = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{ij} (Z_{ij} - \bar{Z})^2},$$

де Z_{ij} – значення висоти рельєфу в точці з координатами i та j , \bar{Z} – середнє значення висоти рельєфу по кадру СЗМ.

За допомогою другого центрального моменту розраховується двовимірне середньоквадратичне відхилення висот рельєфу, а саме:

$$\sigma_2 = \left[\left(\frac{1}{N} \right)^2 \sum_{ij} (Z_{ij} - \bar{Z})^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Представлені розрахунки дають змогу враховувати впливи зовнішніх дестабілізуючих факторів на наноб'єкт та гарантувати можливість корекції спричинених ними відхилень.

Висновки. Існує багато переваг та недоліків у виборі конкретного методу. Очевидно, що найкращої загальної методики не існує. На шляху до створення оптимальної методики вимірювання параметрів рельєфу наноб'єктів існує ряд задач, які потребують вирішення. Серед основних із них є наступні:

– робота з наноб'єктами і наноструктурами пов'язана з наднизькими рівнями сигналу, тому необхідно звести до мінімуму шум та інші джерела похибок, які можуть перешкодити сигналу;

– властивості певних наноматеріалів відмінні від звичайних, через це методи вимірювання мають враховувати специфічні особливості наноматеріалів;

– набори властивостей наноматеріалу є хімічними й електричними, тому при розробці методів вимірювання рельєфу наноб'єктів треба враховувати розмір і структуру наноб'єкта;

– метрологічні засоби нановимірювань мають бути простими у використанні й економічними.

Доведено, що для визначення розміру, геометричної форми та рельєфу наноб'єктів найбільш оптимальним методом є зондова скануюча мікроскопія. Безперечною перевагою цього методу є той факт, що за допомогою СЗМ можна отримати вимірювальну інформацію відразу з відносно великої ділянки поверхні, що дає змогу використовувати цей метод в онлайн-режимі.

Рекомендовано для вимірювання рельєфу наноб'єктів проводити інтеграцію інформації, наданої різними методами, але результати різних методів можуть бути суперечливими в деяких випадках, як зазначено нижче:

1. Кожний метод ґрунтується на необхідності дослідження різних властивостей наноб'єктів.

2. Етапи підготовки зразка можуть модифікувати результати шляхом подальших ненавмисних рухів частинок у матриці, змінюючи середній діаметр, виявлений СЗМ.

3. Невизначеність, яка не враховується, також може вплинути на остаточні вимірювання.

4. При визначенні середнього діаметра розподілу за розміром застосовується різне зважування. Порівняння результатів різних вимірювань однієї і тієї ж методології буде в цьому сенсі менш проблематичним, оскільки наявна похибка є постійною. Тому для перевірки методу похибка має бути точно виміряна, а результати повинні узгоджуватися з іншими методами.

З урахуванням цих вимог, збільшення кількості використовуваних методів вимірювання наноб'єктів підвищить надійність і точність результатів вимірювання а кожний метод надаватиме додаткову інформацію. Основною умовою для правильного порівняння результату є знання конкретних параметрів, на яких базується кожний застосований метод.

Список використаних джерел

- [1] Э. М. Бромберг, и К. Л. Куликовский, *Тестовые методики повышения точности измерений*. Москва: Энергия, 2008.
- [2] С. А. Кононогов, "Исследование измерительных и калибровочных возможностей средств измерений нанометрового диапазона", *Законодательная и прикладная метрология*, № 3, с. 19-25, 2008.
- [3] П. А. Тодуа, "Метрология и стандартизация в нанотехнологиях и nanoиндустрии", *Измерительная техника*, № 5, с. 5-7, 2008.
- [4] The Scanning Probe Image Processor (SPIP) [Online]. Available: www.imagemet.com.
- [5] L. Garnaes, "Two-dimensional nanometer scale calibration based on one-dimensional gratings", *Appl. Phys.*, A 66, pp. 831-835, 1998.
- [6] Nanosurf. "Atomic force microscopy applications". [Online]. Available: [//www.nanosurf.com/en/](http://www.nanosurf.com/en/).
- [7] "Equipment for real-time industrial applications". [Online]. Available: <http://www.digital-instruments.com/>.
- [8] W. Fritzsche, L. Takac, and E. Henderson, "Application of atomic force microscopy to visualization of DNA, chromatin, and chromosomes", *Critical Reviews in Eukaryotic Gene Expression*, vol. 7, pp. 231-240, 1997.
- [9] S. Roth, L. Dellmann, G. A. Racine, and N. F. de Rooij, "High aspect ratio UV photolithography for electroplated structures", *J. Micromech. Mecroeng.*, vol. 9, pp. 105-108, 1999.
- [10] AZOnano. [Online]. Available: [//www.azonano.com/](http://www.azonano.com/).
- [11] R. A. Said, "Microfabrication by localized electrochemical deposition: experimental investigation and theoretical modeling", *Nanotechnology*, vol. 15, p. 867, 2004.
- [12] H. Iwasaki, T. Yoshinobu, and K. Sudoh, "Nanolithography on SiO₂/Si with a scanning tunneling microscope", *Nanotechnology*, vol. 14, pp. 55-62, 2003.

- [13] A. Majumdar, P. I. Oden, J. P. Carrejo, L. A. Nagahara, J. J. Graham, and J. Alexander, "Nanometer-scale lithography using the atomic force microscope", *Appl. Phys. Letters*, vol. 61, pp. 2293-2295, 1992.
- [14] C. K. Hyon et al., "Application of atomic-force-microscope direct patterning to selective positioning of InAs quantum dots on GaAs", *Appl. Phys. Letters*, vol. 77, pp. 2607-2609, 2000.
- [15] M. Falvo et al., "The nanomanipulator: A teleoperator for manipulating materials at the nanometer scale", in *Proc. Int. Symp. On Science and Technology of Atomically Engineered Materials*, 1996, pp. 579-586.
- [16] M. Sitti, and H. Hashimoto, "Tele-nanorobotics using atomic force microscope as a robot and sensor", *Advanced Robotics Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 417-436, 1999.
- [17] M. Sitti, and H. Hashimoto, "Two-dimensional fine particle positioning under optical microscope using a piezoresistive cantilever as a manipulator", *Journal of Micro-mechatronics*, vol. 1, no. 1, pp. 25-48, 2000.
- [7] "Equipment for real-time industrial applications". [Online]. Available: <http://www.digital-instruments.com/>.
- [8] W. Fritzsche, L. Takac, and E. Henderson, "Application of atomic force microscopy to visualization of DNA, chromatin, and chromosomes", *Critical Reviews in Eukaryotic Gene Expression*, vol. 7, pp. 231-240, 1997.
- [9] S. Roth, L. Dellmann, G. A. Racine, and N. F. de Rooij, "High aspect ratio UV photolithography for electroplated structures", *J. Micromech. Mecroeng.*, vol. 9, pp. 105-108, 1999.
- [10] AZOnano. [Online]. Available: <http://www.azonano.com/>.
- [11] R. A. Said, "Microfabrication by localized electrochemical deposition: experimental investigation and theoretical modeling", *Nanotechnology*, vol. 15, p. 867, 2004.
- [12] H. Iwasaki, T. Yoshinobu, and K. Sudoh, "Nanolithography on SiO₂/Si with a scanning tunneling microscope", *Nanotechnology*, vol. 14, pp. 55-62, 2003.

References

- [1] E. M. Bromberg, and K. L. Kulikovskiy, *Test methods for improving measurement accuracy*. Moscow: Energiya, 2008. [in Russian].
- [2] S. A. Kononogov, "Investigation of measuring and calibration capabilities of measuring instruments of the nanometer range", *Zakonodatelnaya i prikladnaya metrologiya*, no. 3, pp. 19-25, 2008. [in Russian].
- [3] P. A. Todua, "Metrology and standardization in nanotechnology and nanoindustry", *Izmeritel'naya tekhnika*, no. 5, pp. 5-7, 2008. [in Russian].
- [4] The Scanning Probe Image Processor (SPIP) [Online]. Available: www.imagemet.com.
- [5] L. Garnaes, "Two-dimensional nanometer scale calibration based on one-dimensional gratings", *Appl. Phys.*, A 66, pp. 831-835, 1998.
- [6] Nanosurf. "Atomic force microscopy applications". [Online]. Available: <http://www.nanosurf.com/en/>.
- [13] A. Majumdar, P. I. Oden, J. P. Carrejo, L. A. Nagahara, J. J. Graham, and J. Alexander, "Nanometer-scale lithography using the atomic force microscope", *Appl. Phys. Letters*, vol. 61, pp. 2293-2295, 1992.
- [14] C. K. Hyon et al., "Application of atomic-force-microscope direct patterning to selective positioning of InAs quantum dots on GaAs", *Appl. Phys. Letters*, vol. 77, pp. 2607-2609, 2000.
- [15] M. Falvo et al., "The nanomanipulator: A teleoperator for manipulating materials at the nanometer scale", in *Proc. Int. Symp. On Science and Technology of Atomically Engineered Materials*, 1996, pp. 579-586.
- [16] M. Sitti, and H. Hashimoto, "Tele-nanorobotics using atomic force microscope as a robot and sensor", *Advanced Robotics Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 417-436, 1999.
- [17] M. Sitti, and H. Hashimoto, "Two-dimensional fine particle positioning under optical microscope using a piezoresistive cantilever as a manipulator", *Journal of Micro-mechatronics*, vol. 1, no. 1, pp. 25-48, 2000.

V. P. Kvasnikov, *D.Tech.Sc., professor,*
M. O. Kataieva, *Ph.D.*
e-mail: kataeva.mariia@gmail.com
National Aviation University
Liubomyr Huzar ave., 1, Kyiv, 03058, Ukraine

ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF METROLOGICAL SUPPORT OF MEASUREMENTS OF NANOOBJECTS RELIEF

The article analyzes the existing methods and means of measuring objects in the nanometer range and develops their classification based on the main principles of use. The main parameters on which each described method is based are considered and the conditions for their most effective application are determined. It is proved that chemical and electrical sets of properties of the nanomaterial can change when the particle size decreases to the nanometer size, which requires the inclusion of additional chemical and electrical tests in existing methods. Based on the analysis, it has been determined that the method of scanning probe microscopy is the most functional and universal in solving a wide range of problems. The classification of existing methods of scanning probe microscopy based on the nature of their applications is developed. The main directions of creation and use of methods of measurement of micro- and nanosystems are determined, namely: creation of model representations of connections of topological characteristics and reaction of object to external influences, establishment of communications between properties of an element or system, research of structure, charges and fields, establishing links between technological factors, the kinetics of formation and the properties of nanostructures, creation of models that link functional parameters of devices with the properties of structures.

It is proved that in order to obtain more reliable results, the method of nanomeasurements should take into account the effects of external destabilizing factors on the nanoobject and ensure the possibility of correcting the deviations caused by them. To simplify the process of choosing nanomeasurement methods, a method for detecting deviations due to the influence of external destabilizing factors has been developed. Universal expressions for the description of a stream of the revealed deviations of nanoobjects of various configuration are received. It is recommended to use techniques based on the principle of integration of information provided by different methods to increase the accuracy of nano-measurements. It is proved that increasing the number of measurement methods used in the metrological analysis of nanoobjects will increase the reliability and accuracy of measurement results and each method will provide additional information.

Keywords: *nanotechnology, nanomeasurement, metrological support, methods and means of measurement, nanomaterials.*

Стаття надійшла 18.02.2021

Прийнято 11.03.2021