

УДК 681.12

Й.Й. БІЛИНСЬКИЙ, І.В. МИКУЛКА, Б.П. КНИШ  
Вінницький національний технічний університет**КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАНЬ  
РОЗМІРІВ МІКРОСКОПІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ**

*Проведено аналіз методів вимірювань розмірів мікроскопічних об'єктів та запропоновано їх класифікацію.*

*The analysis methods of measuring the size of microscopic objects and proposed classification.*

Ключові слова: вимірювання розмірів, мікроскопічний об'єкт, класифікація.

**Вступ.** На сьогодні в промисловості для вимірювань мікророзмірів використовується багато різновидів приладів, заснованих на різних методах мікроскопії. Слід зазначити, що на початковому етапі мікроскопію використовували виключно для отримання зображень об'єктів, натомість зараз мікроскопія широко застосовується для отримання геометричних розмірів мікрооб'єктів. Мікроскопія пройшла складний шлях розвитку й кожне її досягнення супроводжувалося, насамперед, збільшенням роздільної здатності, спостереженням за великим полем (введення растрового режиму), підвищенням автоматизації збору, обробки і відображення результатів вимірювань [1].

Велика кількість методів вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів не дозволяє досліднику безпомилково обрати той чи інший метод, тому з'явилась необхідність розробити їх класифікацію, що і було поставлено за мету роботи.

**Основна частина.** Розвиток існуючих та створення нових методів вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів неможливі без аналізу досягнутого рівня, їх різновидів і якості існуючих підходів. Тому в роботі на основі аналізу літературних джерел запропоновано класифікацію методів вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів (рис.1). Основною ознакою класифікації відомих методів вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів є специфіка впливу на об'єкт, який обумовлює власне сам процес вимірювання та його особливості. Таким чином з усіх методів можна виділити світлові (традиційні), електронні та нетрадиційні методи вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів. Світлові методи вимірювання поділяються на люмінесцентні, ультрафіолетові, інфрачервоні, рентгенівські, лазерні, поляризаційні та інші, а силові – на іонні, електронні (растрові та тунельні) та магнітні [6–7]. Нетрадиційні методи поєднують різні процеси вимірювання та пристосовані або спеціально призначені для використання в мікроелектроніці.

Встановлено, що переважна більшість методів вимірювання є світловими, в яких реєстрація об'єкта виконується за допомогою фотоприймальних приладів, таких як фотолінійка та фотоматриця [8]. Світлові методи мають ряд переваг, таких як простота, надійність, відносно висока швидкість отримання результату, а також порівняно низька вартість. Обмеження, що існують для світлових мікроскопів при вимірюванні малих розмірів інтегральних мікросхем, зазвичай, пов'язують з обмеженням їх роздільної здатності (до 0,2 мкм) [9].

Для досягнення високої роздільної здатності об'єкта, що вимірюється в світлових мікроскопах, використовуються об'єктиви з високою числовою апертурою. Але при цьому глибина різкості зменшується обернено пропорційно квадрату апертури, що формально призводить до "планаризації" вимірюваного об'єкта з малими розмірами. Перешкоди, що ускладнюють вимірювання розмірів, пов'язані з самим об'єктом та доповнюються перешкодами, що обумовлені світловим мікроскопом навіть у межах його роздільної здатності.

Електронні методи [10, 11] вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів основані на хвильовому трактуванні потоку електронів, згідно з яким потік електронів певної енергії можна інтерпретувати як випромінювання з довжиною хвилі, що відповідає цій енергії. Підвищення кінетичної енергії електронів еквівалентне зменшенню довжини хвилі [12]. При цьому спостерігається збільшення роздільної здатності (яка в даний час наближається до 0,1 нм) [13]. Перевагами таких методів є великий діапазон збільшення (до 100000 і вище), велика глибина фокусування (~ 100 мкм), різноманіття режимів роботи і можливість отримання інформації про об'єкт у вигляді електричного сигналу, що дозволяє розробити високочутливі засоби вимірювань лінійних розмірів [1]. Проте, недоліками електронних методів є складність отримання тривимірних зображень поверхні, проведення вимірювань тільки в умовах вакууму, можливість пошкодження досліджуваної поверхні високоенергетичним сфокусованим пучком електронів.

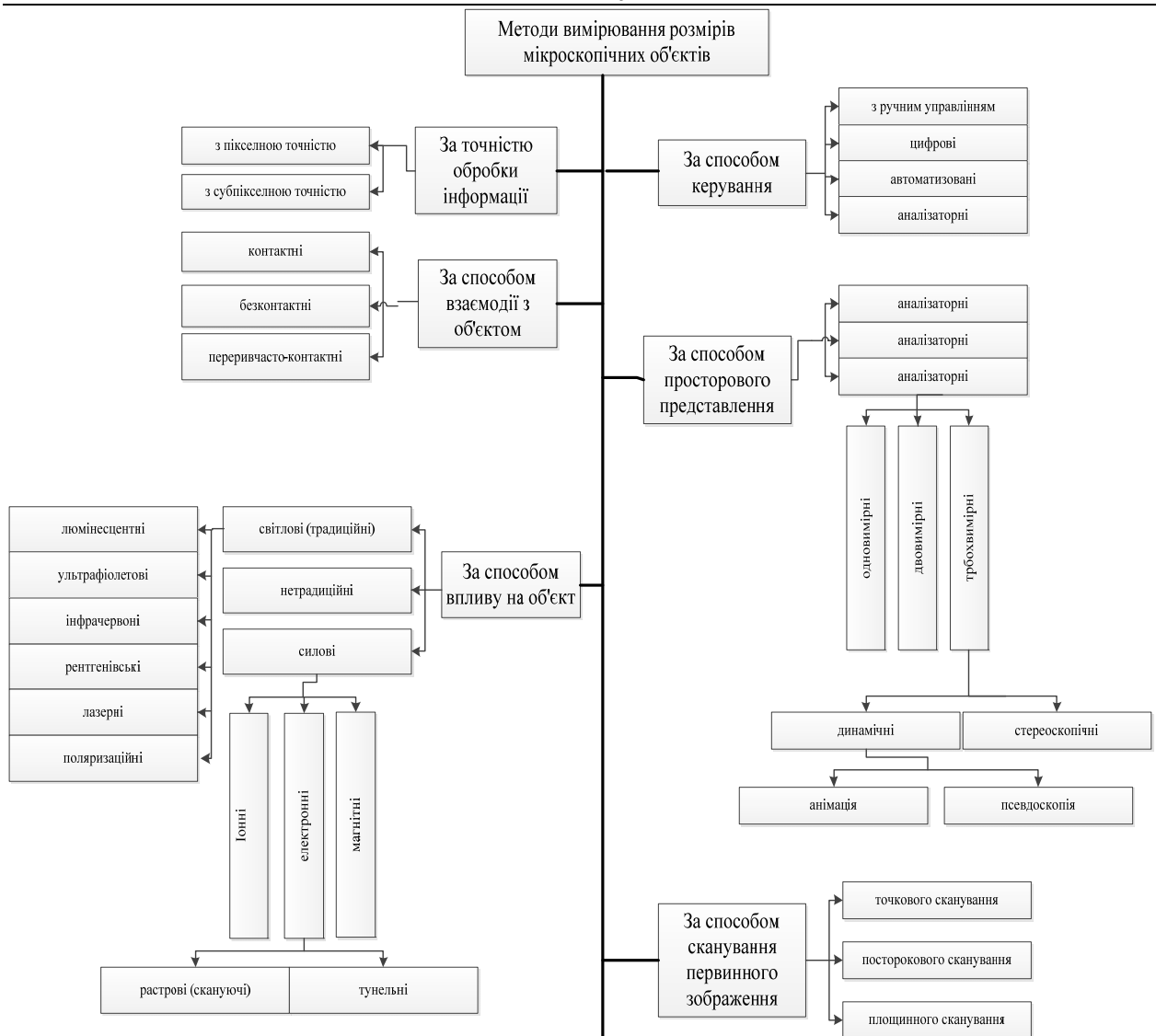


Рис.1. Класифікація методів вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів

Неспроможність усунути існуючі недоліки традиційними (світловими) методами призвела до появи принципово нових («нетрадиційних») методів вимірювань. На сьогодні отримали найбільш широке поширення серед інших нетрадиційних методів вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів вимірвальні прилади, що засновані на методі конфокальної лазерної скануючої мікроскопії (КЛІСМ). Термін "конфокальна" означає "софокусна" у площині, оптично сполучено з фокальною площиною об'єктива. Це дозволяє реєструвати сигнал лише від тонкого шару. Зразок у КЛІСМ сканується сфокусованим лазерним пучком. Характерними рисами, що вирізняють конфокальну лазерну скануючу мікроскопію з поміж інших різновидів мікроскопії, є її покращена просторова та часова роздільна здатність [14, 15]; високий рівень контрастності зображень; детальне дослідження визначеної ділянки препарату завдяки селективному опроміненню лазером [16]. Конфокальна мікроскопія дозволяє отримувати "оптичні зрізи" живих та фіксованих препаратів завтовшки до 100 мкм [17], проводити дослідження у діапазоні 400–759 нм [16, 17]. Фактично конфокальний мікроскоп спроможний виявити присутність окремої молекули [18]. Проте, незважаючи на покращену роздільну здатність (5–10 нм) конфокального мікроскопа, деталізація зображень, отриманих за допомогою електронного мікроскопа, чіткіша [19].

Наступними класифікаційними ознаками є здатність впливу на об'єкт, спосіб керування, способи просторового представлення, сканування первинного зображення, та точність обробки результату. Слід зауважити, що такий розподіл є досить умовним.

За способом взаємодії з об'єктом методи вимірювання розмірів поділяються на контактні, безконтактні та переривчато-контактні. В порівнянні з контактними та переривчато-контактними, безконтактні мають ряд переваг, основною з яких є те, що ці методи не взаємодіють з об'єктом, що виключає пошкодження його структури [2].

За способом керування методи вимірювання можна виділити: традиційні з ручним керуванням, цифрові, автоматизовані та аналізаторні. В традиційних методах з ручним керуванням відповідальність за умови нагляду, вибір об'єктів та результати аналізу в повній мірі покладається на лаборантів. Іншим видом є так звані «цифрові» методи, в яких зображення поля зору за допомогою відеокамери чи цифрового

фотоапарату передаються в комп'ютер та піддаються в ньому програмній обробці системами аналізу зображення.

Основне призначення автоматизованих методів – це автоматизація простих операцій, що повторюються. Проаналізовані методи дозволяють самостійно переміщувати та фокусувати препарат, обирати траєкторію перегляду залежно від розподілення біоматеріалу, контролювати якість освітлення та окраску, знаходити та записувати в базу даних зображення об'єктів заданих типів [20]. Таким чином розвиток методів вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів сприяє зменшенню ролі людини в процесі вимірювань, що забезпечує більшу точність отриманих результатів.

За способом просторового представлення об'єктів, що вимірюються розрізняють одновимірні, двохвимірні та трьохвимірні методи вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів. Найбільш поширені двохвимірні методи. Проте, з розвитком комп'ютерної техніки та програмного забезпечення все більшу роль займають трьохвимірні методи тому, що вони дають більше інформації про вимірюваний об'єкт [8].

За способом сканування первинного зображення методи вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів поділяють точкового, построкового та площинного сканування. Усі ці методи використовують обробку отриманих зображень з метою підвищення їх якості. Слід зазначити, що метод точкового сканування є найбільш інформативним. Проте, недоліком цього методу порівняно з методом построкового та площинного сканування є тривалий час обробки, оскільки сканується кожен піксель зображення. Важливим фактором в моменті дослідження об'єктів за допомогою методів вимірювання є подальша обробка, метою якої є підвищення контрасту, фільтрація та виділення контурів зображення. Для високоточного виділення контурів розрізняють методи вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів як з піксельною, так і з субпіксельною точністю. Субпіксельні методи забезпечують більш високу точність виділення границь та направлені на зменшення похибки, що складає менше половини ширини пікселя [21].

**Висновки.** На основі проведеного аналізу методів вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів запропоновано їх класифікацію, основними класифікаційними ознаками якої є: точність обробки результату, спосіб взаємодії з об'єктом, спосіб впливу на об'єкт, спосіб керування, спосіб просторового представлення та спосіб сканування первинного зображення. За основну ознаку обрано спосіб впливу на об'єкт, оскільки він зумовлює різноманітність існуючих методів та їх фізичні особливості.

Як видно з аналізу не існує ідеального методу для визначення розмірів в мікрометровому діапазоні, тому дана проблематика потребує вирішення. Одним із напрямків підвищення точності вимірювань є розробка не тільки методів вимірювання розмірів мікроскопічних об'єктів, але розробка та удосконалення існуючих методів для обробки отриманого зображення.

### Література

1. Кузин А.Ю. Методы и средства измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне [Електрон. ресурс] / Кузин А.Ю., Марютин В.Н., Календин В.В. – Режим доступу : <http://www.microsystems.ru>
2. Hamashima N. Optical measurements of half micron critical dimentions / Hamashima N., Kato K., Ishizeki T. – Ibid P. 92-99.
3. Binnig G. Tunnling through a controllable vacuum gap / Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E. - A ppl. Phys. Lett. . – 1982. – V. 40. – N. P. 178–180.
4. Бинниг Г. Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности / Г. Бинниг, Г. Рорер // УФН. – 1988. – Т. 151. – № 2. – С. 261–278.
5. Маслова Н.С. Сканирующая туннельная микроскопия атомной структуры, электронных свойств и поверхностных химических реакций / Н.С. Маслова, В.И. Панов // УФН. – 1988. – Т. 157. – № 1. – С. 185–195.
6. Эдельман В.С. Развитие сканирующей туннельной и силовой микроскопии / Эдельман В.С. – ПТЭ. – 1991. – № 1. – С. 24–42.
7. Бухараев А.А. Диагностика поверхности с помощью сканирующей туннельной микроскопии / Бухараев А.А. – Заводская лаборатория. – 1994. – № 10. – С. 15–25.
8. Линейные измерения в субмикронном диапазоне / [Богданкевич О.В., Календин В.В., Кудяров Ю.А., Невзорова Л.Н.]. – Метрологическая служба в СССР. – 1987. – Вып. 3. – С. 31–35.
9. Nyussonen D. – Opt. Soc. Amer. – 1982. – V. 72. – № 10. – 1425 p.
10. Измерение малых длин на основе РЭМ / [О.В. Богданкевич, Ж. Желкобаев, В.В. Календин та ін.] // Измерительная техника. – 1985. – № 11. – С. 31–33.
11. Невзорова Л.Н. Поверхность. Физика, химия, механика / Невзорова Л.Н., Петров В.И., Щитов Н.И. – 1982. – № 11.
12. Шклярський В.І. Сканувальна телевізійна оптична мікроскопія: теорія та практика : [монографія] / Шклярський В.І. – Вид-во Львівської політехніки. – 2010. – 456 с.
13. Васильев С.И. Сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия поверхности в метрологии / С.И. Васильев, В.М. Мостепаненко, В.И. Панов // Измерительная техника. – 1990. – № 1. – С. 9–22.
14. Robert H.W. Confocal optical microscopy / Robert H.W. — Rep. Prog.Phys. — 1996. — 59. P. 427—471.

15. Rowland R.E. Confocal microscopy opens the door to 3-dimensional analysis of cells / Rowland R.E., Nickless E.M. – Bioscene. – 2000. – 26(3). – P. 1–7.
16. Verveer P.J. A comparison of image restoration approaches applied to three-dimensional confocal and widefield fluorescence microscopy / Verveer P.J., Gemkow M.J., Jovin T.M. – J.Microscopy. – 1999. – 193. – P. 50–61.
17. Claxon N.S. Laser scanning confocal microscopy / Claxon N.S., Fellers T.J., Davidson M.W. – Olympus Fluoview Resource Center. – National High Magnetic Field Laboratory. – Retrieved on 2007-07-25.
18. Peternam E.A. Single molecule spectroscopy and microscopy for biomedical motors / Peternam E.A., Sosa H., Moerner W.Ю – Ann. Rev. Phys. Chem. – 2004. – 55. – P. 79–96.
19. Pawley J. Fundamental limits in confocal microscopy/ Pawley J. – Handbook of biological confocal microscopy. – New York: Plenum Press. – 1995. – P. 19.
20. Дюков В.Г. Растровая оптическая микроскопия / В.Г. Дюков, Ю.А. Кудеяров. – М. : Наука. – 1992. – 208 с.
21. Кондратов В.Т. Визуализация в метрологии: урони, напрвления, цели, задачи, методы и программное обеспечение/ В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2001. – №1. – С. 7–22.

Надійшла 5.9.2011 р.

УДК 539.234

Б.П. ЯЦИШИН, Н.І. ДОМАНЦЕВИЧ  
Львівська комерційна академія

## ОПТИМІЗАЦІЯ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ КРИТЕРІЇВ ЗІ СТВОРЕННЯ МІКРОКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ СЕНСОРНИХ ПРИСТРОЇВ

*Створено модель та проведено розрахунки з математичного прогнозування умов формування тонких плівок тернарних систем. Розроблена модельна графіка дає змогу оцінити часові зміни фізичних характеристик конденсатів.*

*The diagrammatical model is created and the calculation from mathematical prediction of forming requirements of thin films ternary systems is produced. The designed model graph enables to estimate changes of physical properties of condensates.*

Ключові слова: тонкі плівки, термоелектрорушійна сила, часова стабільність.

**Вступ.** Для створення тонкопліткових матеріалів, які визначаються структурою та фізичними характеристиками, необхідними для використання та експлуатації, першочергово застосовуються методи математичного моделювання, з допомогою яких визначаються найбільш перспективні для досліджень склади та умови формування конденсатів. Отримані таким чином математичні моделі також використовуються як джерело інформації, необхідної для створення систем оптимального управління процесом “випаровування–конденсації”, і можуть застосовуватись для різних технологічних методів отримання конденсатів (дискретне випаровування сплавів, узгоджене випаровування тощо).

**Методика досліджень.** Технологічний процес отримання тонких плівок інтерметалідів та формування наноструктур на їх основі має низку особливостей щодо проведення моделювання, а саме: недостатній рівень автоматизації, відсутність засобів і методів оперативного контролю формування структур, дискретно-неперервний характер технологічних процесів, що призводять до утворення великої кількості різновидів структур, складність спостереження за зміною параметрів процесу “випаровування–конденсації” та перетворень “аморфна–кристалічна фаза”. Вибір самої математичної моделі визначається, з одного боку, обмеженнями, які накладаються концентраційним складом матеріалу, з іншого боку – низькою інформативністю пасивних статистичних методів дослідження технологічних особливостей формування структури конденсатів.

Виходячи із перспективності матеріалів тернарних систем рідкісноземельний (або 5-*d*) метал-перехідний метал-германій (R-M-Ge, де R: Sc, Y, La, Hf; M: Fe, Co, Ni) в якості термоелектричних перетворювачів, були додатково встановлені основні параметри тонкопліткового матеріалу, які визначали якісні характеристики первинного перетворювача, а саме – термо-е.р.с. –  $y_1$  та часова стабільність –  $y_2$ . Діапазони змін параметрів технологічних процесів визначався з літературних джерел та експериментально [1, 2]. При цьому було встановлено, що найбільш значущими факторами, що найсуттєвіше впливають на фізичні властивості РЗМ, є концентрація металу ( $x_1$ ), швидкість росту ( $x_2$ ) та температура підкладки під час конденсації ( $x_3$ ).

Число проведених досліджень зі встановлення взаємозв'язку технологічних параметрів та фізичних характеристик зразків визначали згідно з ортогональним планом другого порядку Бокса-Вілсона [3].

**Результати досліджень.** При знаходженні оптимальної області значень факторів визначались умови планування експерименту [5, 6]. Факторний експеримент здійснювався з використанням 3-х змінних.