

НАНОРОБОТИЧНІ МАНІПУЛЯТОРИ В СКАНУЮЧІЙ МІКРОСКОПІЇ

доцент Бородін А.В., ст. викл. Карнаушенко В.П.

Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра МЕЕПШ,
e-mail: vladimir.karnaushenko@nure.ua

Abstract. A scanning microscopy provides real-time imaging with nanometer resolution and a large scanning area, which enables the development and integration of robotic nanomanipulation systems with nanoscaled samples. Emerging techniques enable the characterization of nanostructures and the assembly of nanodevices. This presents recent advances in nanorobotic manipulation, tools, sensing units, control and automation techniques, enabled applications. The limitations of the existing technologies and prospects for new technologies are discussed.

Вступ. Різноманітність наноматеріалів, таких як нанотрубки, нанопроволоки, плазмонні та напівпровідникові наноматеріали, двовимірні матеріали, такі як графен та дихалькогеніди перехідних металів, вимагає дослідження їх характеристик та властивостей для розуміння їх поведінки та вивчення можливостей їх застосування в наноелектроніці, нанофотоніці, біології і медицині. Виготовлення нанорозмірних пристроїв та наноелектромеханічних систем (НЕМС), які використовують наноматеріали, також вимагають чітких методів та засобів позиціонування, зондування та збірки з нанометровою роздільною здатністю.

Основна частина. Підходи до побудови нанорозмірних приладів можна розділити на методи "згори-вниз", "знизу-вгору" та "наноманіпуляція". Підходи згори – вниз, як правило, використовують такі методи, як рентгенівська, електронно-променева літографія і наноімпринтна літографія. Технології знизу, так само як і збірка, хімічний синтез або супермолекулярні методи, що зумовлено тенденцією фізичних систем звести до мінімуму їх потенційну енергію. Ці методи дозволяють побудувати конструкції та пристрої за допомогою прямого з'єднання атомів і молекул; однак модифікація окремих комірок для налаштування властивостей пристрою може бути дуже складною задачею. Нанороботичні маніпулятори є пристроями, що дозволяють гнучке та точне позиціонування зондів для визначення характеристик різноманітних структур, розробки прототипів нанорозмірних приладів та модифікації властивостей матеріалів.

Перший експеримент з нанороботичних маніпуляцій був виконаний Ейглером та Швейцером у 1990 році зі скануючим тунельним мікроскопом (СТМ) для формування логотипа ІВМ. Проте СТМ вимагає використання електропровідних зондів та зразків внаслідок його принципу роботи. Атомно-силовий мікроскоп (АСМ) дозволяє маніпулювати нанорозмірними матеріалами в навколишньому середовищі, у рідині та в вакуумі, що дозволяє досліджувати електропровідні, непровідні та

біологічні матеріали. Проте, виконання одночасно маніпуляцій та створення зображень за допомогою АСМ залишається складним.

Трансмісійний електронний мікроскоп (ТЕМ), який випромінює електрони високої енергії, що проходять через зразок, має роздільну здатність зображення на рівні субнанометрів. З розвитком коректорів аберації, сучасні ТЕМ можуть досягти роздільної здатності зображення на десятки пікометрів та виконувати вимірювання атомарного рівня для дослідження структурної динаміки. Проте робочий принцип ТЕМ вимагає спеціальної підготовки зразків, а невелика камера та робоча область ТЕМ обмежують можливості комплексної наноманіпуляції. В той же час, Скануючий мікрохвильовий мікроскоп (СММ) за рахунок більшої кількості ділянок сканування, виявляє характеристики, що забезпечують візуалізацію зображення об'єктів в режимі реального часу на нанометровому рівні. Ці переваги дозволяють отримати одночасно зображення та точну наноманіпуляцію.

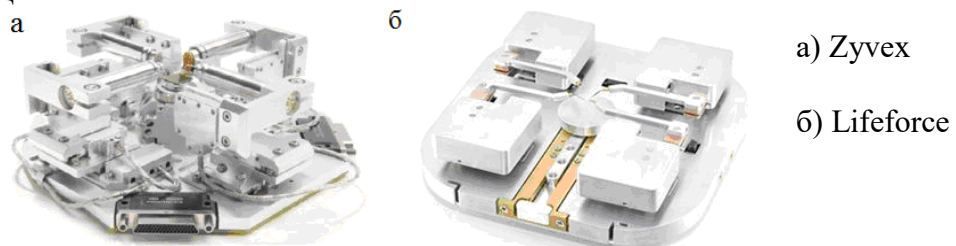
Вже з 90-х років було побудовано ряд систем маніпуляцій для роботи в скануючих мікроскопах (СМ). Однак, перші системи були здатні маніпулювати лише відносно великими об'єктами та не могли виконувати складні задачі внаслідок наявності інерції та механічного люфту. Зараз на базі інструментів з нанометровою роздільною здатністю побудовані платформи нанороботів з різними ступенями свободи (СС) та п'єзоелектричними виконавчими механізмами, що дозволяє реалізувати складні задачі, починаючи від механічних випробувань на розтягування та електромагнітного зондування наноматеріалів, електронне та фотонне прототипування, збірку НЕМС, маніпуляцію біологічними об'єктами та екстракцію внутрішньоклітинних органел. Найсучасніші наноманіпулятори на базі СМ також інтегровані з різними системами та змінними наборами інструментів. Це обумовило поштовх до створення потужних нано-лабораторій, які здатні одночасно, з високою ефективністю і відтворюваністю проводити дослідження та модифікацію матеріалів та структур за допомогою використання нових методів автоматизації.

Системи наноманіпуляції всередині СМ, в основному, складаються з пристрою керування, сенсорів та програмного забезпечення. Приводи, які використовуються для наноманіпуляції всередині СМ, мають бути компактними і здатні генерувати точні рухи, не заважаючи роботі пристрою. Теплові приводи не можуть ефективно розсіювати тепло, електричні двигуни та електромагнітні виконавчі механізми утворюють поля, які можуть перешкоджати роботі мікрохвильової оптики. П'єзоелектричні виконавчі механізми, які керуються зворотним п'єзоелектричним ефектом, долають ці перешкоди і здатні генерувати достатньо великі сили з субнанометровою роздільною здатністю позиціонування та високою швидкістю. Було розроблено ряд п'єзоелектричних наноманіпуляторів з різними СС для точного

позиціонування та маніпулювання мікро- та нанорозмірними об'єктами такими компаніями, як Zyvex, Kleindiek, SmarAct, Attocube та провідними університетами світу.

Найбільш поширеною конфігурацією наноманіпуляторів є комбінація грубого та точного механізму, або один привід для грубого та точного позиціонування. Наприклад, системи Zyvex та Lifeforce складаються з чотирьох квадрантів наноманіпуляторів з трьома СС, кожний з яких використовує два окремі тривісні п'єзоелектричні виконавчі пристрої для грубого позиціонування та точного позиціонування відповідно. Грубі позиціонери переміщуються відповідно до принципу ковзання, щоб генерувати ступінчасті рухи на високій швидкості на порядок сантиметрів, але з низькою роздільною здатністю і точністю. Окремий прецизійний блок використовує п'єзоспакети, п'єзотрубки або біморфні структури для точного позиціонування зонду і забезпечення переміщення на порядок мікрометрів. Системи Kleindiek та SmarAct також складаються з чотирьох квадрантів наноманіпуляторів з трьома СС, кожна з яких використовує лише один тривісний п'єзоелектричний привід.

Додатково до цих стаціонарних платформ, було також розроблено мобільні наноманіпулятори. Їх активація, як правило, ґрунтується на принципі ковзання або на мобільному механізмі, що використовує п'єзокерамічні виконавчі пристрої. Ці мобільні платформи працюють в середовищі декількох роботів. Проте точне відстеження позиції та орієнтації мобільних роботів є досить складним завданням. Стаціонарні наноманіпуляційні платформи можуть генерувати більш точні рухи, їх локалізацію простіше контролювати, що полегшує автоматичну наноманіпуляцію.



Рисунок– Приклади комерційних систем наноманіпуляції

П'єзоелектричні виконавчі елементи за своєю суттю виявляють нелінійні характеристики гістерезису та повзучості, що знижує точність позиціонування і може викликати нестійкість системи. Існує три типи сенсорів положення для інтеграції з п'єзоелектричними виконавчими механізмами, включаючи ємнісні, оптичні датчики і датчики деформації. Незважаючи на те, що п'єзоелектричні виконавчі елементи, за своєю суттю, мають чуттєві здатності для оцінки сили та переміщення, само суміщення функцій сенсора та актюатора важко реалізувати в п'єзоелектричних пакетах, що зазвичай використовується для побудови нанопозиціонерів.

Ємнісні сенсори забезпечують безконтактний, малопотужний та прямий метод вимірювання положення для отримання точних вимірювань на рівні нанометрів та субнанометрів з швидкістю до 10 кГц та мінімальним нагріванням. Сенсори на основі оптичного датчика генерують сигнали, які здатні забезпечити точний зворотний зв'язок на нанометровій роздільній здатності. Проте оптичні елементи генерують тепло, що може спричинити термічний дрейф навколишніх компонентів та об'єкту дослідження. Аналогічно, датчики на основі деформації також мають тепловий дрейф.

Архітектура управління наноманіпуляторами всередині СМ включає контролер для прямої передачі або управління зворотним зв'язком. Контролер прямої передачі генерує сигнали управління відповідно до значень та режимів гістерезису, повзучості та вібрації. Оскільки управління прямою передачею не покладається на зворотний зв'язок датчика для нанопозиціонування з високою пропускнуою здатністю, перевагами є низька вартість та низька апаратна складність. Однак точність методів прямої передачі залежить як від моделі, так і від параметрів, визначених у моделі, які можуть змінюватися з часом. Контроль зворотного зв'язку використовує зворотний зв'язок датчика, пом'якшує вимоги до моделювання та забезпечує кращі показники щодо точності, придушення вібрації та відхилення невизначеності. Однак зворотний зв'язок впливає на швидкість системи і вимагає інтеграції датчиків в апаратну платформу. Тому застосовують системи, керовані прямим та зворотним зв'язком, для більшої пропускнуої здатності та більш високої точності.

Для автоматизованої наноманіпуляції візуальний зворотний зв'язок у режимі реального часу важливий для забезпечення візуального замкнутого контролю. Щоб уникнути таких проблем, як шум і дрейф зображення СМ, застосовують методи обробки зображення та компенсації дрейфу з використанням методів графічного процесора.

Висновки. Формування гібридних систем шляхом інтеграції різних інструментів СМ надає унікальні можливості. Наприклад, інтеграція СМ/СММ здатна маніпулювати окремими атомами. Завдяки унікальним перевагам програмування та автоматизації, наноманіпуляція всередині СМ надалі перетвориться на більш потужну технологію для галузі електроніки.

Список використаних джерел.

1. Garcia R, Knoll AW, Riedo E. Advanced scanning probe lithography. *Nature Nanotechnology* 2014; 9: 577–587.
2. Liu J, Wen J, Zhang Z et al. Voyage inside the cell: Microsystems and nanoengineering for intracellular measurement and manipulation. *Microsystems & Nanoengineering* 2015; 1: 15020.
3. Fatikow S, Jasper D, Dahmen C et al. Robot-based automation on the nanoscale. *Encyclopedia of Nanotechnology* 2012; 2012: 2246–2264.
4. Fleming AJ. A review of nanometer resolution position sensors: Operation and performance. *Sensors and Actuators A: Physical* 2013; 190: 106–126.