

МЕХАНІЧНІ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ ЗАСОБАМИ СКАНУЮЧОЇ МІКРОСКОПІЇ

ас. Горбенко Є.О., ст. викл. Карнаушенко В.П., ас. Пятайкина М.І.
Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра МЕЕПП,
e-mail: vladimir.karnaushenko@nure.ua

Abstract. Scanning microscopy (SM) has become a powerful technique for the experimental study of nanomaterials, since it can provide unprecedented details for individual nanostructures upon mechanical and electrical stimulus and thus uncover the fundamental deformation and failure mechanisms for their device applications. The given work is devoted to the modern developments in the field of in situ SM-based mechanical and electrical characterization techniques including tensile, compression, bending, and electrical property probing on individual nanostructures, as well as the state-of-the-art electromechanical coupling analysis. In addition, the advantages and disadvantages of in situ SM tests were also discussed with some possible solutions to address the challenges. Critical challenges for the development and design of robust in situ SEM characterization platform with higher resolution and wider range of samples.

Вступ. З розвитком скануючої мікроскопії (СМ) і методів наноманіпуляції і механічних та електричних випробувань стало можливим визначення широкого спектру унікальних властивостей окремих наноструктур безпосередньо всередині скануючих мікроскопів. З'явилась можливість проводити такі маніпуляції, як випробування на розтяг, на тиск і на вигин. В останні роки, за допомогою скануючої мікроскопії, методів нановимірювань і нанообробки із застосуванням МЕМС, ці методи тестування можна поступово поєднувати разом для бажаних маніпуляцій „на місці” всередині СМ.

Основна частина. Серед усіх методів механічного випробування на розтяг – це найпростіший спосіб, який може безпосередньо визначити широкий спектр механічних властивостей, таких як еластичність, пластичність та міцність на руйнування. Оскільки Dingley розробив технологію випробування на розтяг на місці, багато зусиль було приділено цьому напрямку.

Випробування на розтяг також допомагає дослідити механічні характеристики двовимірних наноструктур. Для тонких металевих плівок, які є ключовими компонентами пристроїв мікроелектроніки, Хейк і Сайф представили нову методику випробування на розтяг, яка використовує МЕМС датчики сили для вимірювання механічних характеристик субмікронних окремо стоячих тонких плівок у СМ.

Випробування на компресію наноматеріалів подібні до тих, що застосовуються на макроскопічних зразках, але з деякими модифікаціями, що полегшують як виготовлення зразків, так і подальші маніпуляції за допомогою системи випробувань. Комерційні системи наноіндентації

завжди розглядаються як механічна випробувальна система експериментів на тиск, за винятком того, що гострий наконечник для вдавнення відповідно замінюється на плоский наконечник. Роздільна здатність навантаження та зсуву більшості систем наноіндентації добре підходить для тестування на мікро- та нанокомпресію, оскільки вони, як правило, створюють криві деформацій напруження з нанорозмірною роздільною здатністю для зразків відповідного масштабу. На рисунку 1 показано типовий тест на стиснення наностовпчика, який був виготовлений сфокусованим іонним пучком.

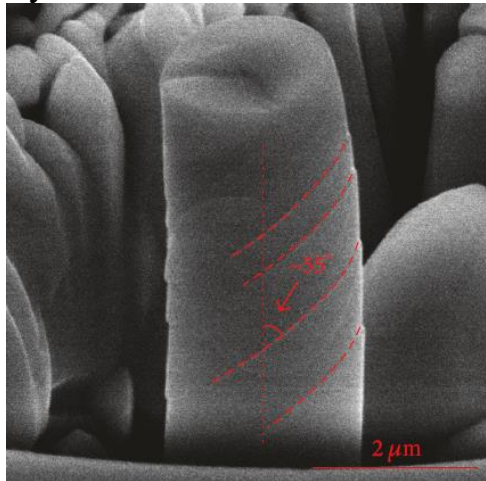


Рисунок 1 – Типовий тест на посткомпресію наностовпчика ніобію, який руйнувався із вираженим зміщенням ковзання

Механізм руйнування матеріалів, що стискаються, може бути найбільш важливим для дослідників через особливий напружений стан, який зазвичай не є повністю одновісним. Цей підхід спричинив низку досліджень, і традиційні закони пластичності на малих масштабах були оскаржені, оскільки загальні розміри зразків обмежували масштаби довжини, доступні для пластичних процесів. Зокрема, для аморфних матеріалів (металеве скло), які зазвичай мають високу міцність, під час випробувань на стиснення було виявлено низьку неоднорідну пластичність наностовпчиків.

Система наноіндентації придатна не тільки для випробування на стиснення наностовпчиків, але також корисна для кількісної характеристики тонких плівок. Оскільки деякі тонкі керамічні плівки широко використовуються як захисне покриття в трибологічних додатках, стало необхідним дослідити мікротвердість, модуль Юнга та в'язкість їх руйнування. Зі зменшенням розмірів виконавчих механізмів та датчиків наноіндентація може давати більше інформації про утворення та розповсюдження механічних дислокацій та дефектів під час експерименту, щоб співвіднести дані про переміщення навантаження з мікроструктурними змінами на місці.

Оскільки ці тонкі плівки безпосередньо осідали або вирощувались на підкладці, експерименти показують механічні властивості композитної структури, а не самої тонкої плівки, особливо для все тонших плівок. Для того, щоб позбутися впливу підкладки, деякі дослідники провели випробування на окремо стоячих тонких плівках. Леземан та Макін розробили нову систему вдавнення для дослідження окремо стоячих тонких плівок Au з кулястим наконечником вдавнення. Незважаючи на те, що він не проводився всередині СМ, він має можливість одночасно реєструвати прикладене навантаження та зміщення мембрани.

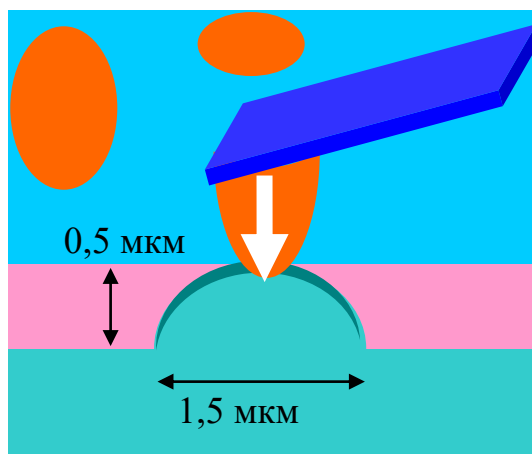


Рисунок 2 – Схематична ілюстрація наноіндентації на окремо стоячій графеній плівці.

Електричні властивості також є важливим фактором, який впливає на надійність металевих і напівпровідникових нанопроводів, крім їх механічних властивостей, коли вони служать елементами з'єднань та конструктивними блоками в застосуванні наноприладів та наноелектроніки. Хоча важко виміряти різні електричні властивості наноматеріалів, за допомогою нещодавно розроблених методів, таких як наноманіпулятори та система наноіндентації, було отримано багато цікавих результатів, як показано на рис. 2

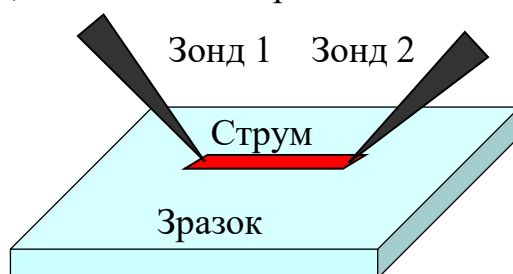


Рисунок 3 – Схематична ілюстрація електричного зондування окремого нанопроводу всередині СМ.

Ефект електромеханічного зчеплення важливий фактор нанотехнологій. Розуміння електромеханічних властивостей наноматеріалів є важливим для подальшого застосування у металевих та

напівпровідникових системах. Наприклад, п'єзорезистивні або п'єзоелектричні властивості нанопроводів можуть бути використані в якості чутливих елементів сенсорів, фотонних та електронних елементів. В електромеханічних дослідженнях нанопроволок найпоширенішим підходом є деформування зразка та вимірювання електричної реакції зразка (опір, генерований заряд тощо) за допомогою двох або чотирьох електричних контактів, таких самих, як на рисунку 5.

Однак цей метод часто включає контактний опір і може ввести бар'єри Шотткі. Щоб уникнути цих проблем, були розроблені чотирьох зондові пристрої, призначені для електромеханічних вимірювань.

Висновки. Експерименти в області наноманіпуляції із застосуванням скануючої мікроскопії показують не тільки унікальні властивості наноматеріалів, але також надають корисний матеріал для подальших досліджень. Незважаючи на значний прогрес, в області нановимірювань на місці все ще залишаються такі проблеми, як швидкодія та складність експериментів для отримання більш переконливих статистичних даних. Подальший розвиток як апаратного, так і програмного забезпечення дозволить створити ще менші, тонкіші, точніші та більш універсальні методи тестування для СМ на місці та забезпечить платформу до застосування наноматеріалів повсюди.

Список використаних джерел.

1. D. J. Dingley, "A simple straining stage for the scanning electron microscope," *Micron* (1969), vol. 1, no. 2, pp. 206–210, 1969.
2. D. S. Gianola, A. Sedlmayr, R. Mnig et al., "In situ nanomechanical testing in focused ion beam and scanning electron microscopes," *Review of Scientific Instruments*, vol. 82, no. 6, Article ID 063901, 2011.
3. M. A. Haque and M. T. A. Saif, "Application of MEMS force sensors for in situ mechanical characterization of nano-scale thin films in SEM and TEM," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 97-98, pp. 239–245, 2002
4. H. Zhang, K. W. Siu, W. Liao, Q. Wang, Y. Yang, and Y. Lu, "In situ mechanical characterization of CoCrCuFeNi high-entropy alloy micro/nano-pillars for their size-dependent mechanical behavior," *Materials Research Express*, vol. 3, no. 9, Article ID 094002, 2016.
5. C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar, and J. Hone, "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene," *Science*, vol. 321, no. 5887, pp. 385–388, 2008.
6. Z. C. Leseman and T. J. Mackin, "Indentation testing of axisymmetric freestanding nanofilms using a MEMS load cell," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 134, no. 1, pp. 264–270, 2007
7. R. He and P. Yang, "Giant piezoresistance effect in silicon nanowires," *Nature Nanotechnology*, vol. 1, no. 1, pp. 42–46, 2006
8. Z. L. Wang and J. Song, "Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays," *Science*, vol. 312, no. 5771, pp. 243–246, 2006.