

УДК 621.396.662

DOI: 10.31891/2219-9365-2021-68-2-9

КВАСНІКОВ В. П., КАТАЄВА М. О., ШКВАРНИЦЬКА Т. Ю.
Національний авіаційний університет

РОЗРОБКА МЕТОДУ КАЛІБРУВАННЯ СКАНУЮЧОГО ЗОНДОВОГО МІКРОСКОПУ

В статті досліджено методи внесення корекції у вимірювання нанооб'єктів з глибинною структурою із використанням скануючого зондового мікроскопу та розроблено методику проведення тривимірного калібрування розміру кроку датчика по поверхні вимірювального нанооб'єкту. Проаналізовано існуючі методики подібних вимірювань та доведено, що у більшості випадків при математичному розрахунку кроку датчика у нанометровому діапазоні та подальшій цифровій обробці результатів вимірювання, відсутній зв'язок між горизонтальними і вертикальними рухами, що може призвести до значних відхилень між реальними розмірами вимірювального об'єкту та його цифровою моделлю. Запропонована фізична модель процесу вимірювання, яка полягає в тому, що мікроскоп відображає висоту поверхні в ортогональному растровому вигляді та розроблена методика корекції цифрових зображень тривимірної поверхні нанооб'єкту у відповідності з еталоном, яка надає можливість коригування отриманих результатів вимірювання в режимі on-line.

Ключові слова: вимірювання нанооб'єктів, скануючий зондовий мікроскоп, методика тривимірного калібрування, розміру кроку датчика.

V. KVASNIKOV, M. KATAIEVA, T. SHKVARNYTSKA
National Aviation University, Kyiv

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF CALIBRATION OF THE SCANNING PROBE MICROSCOPE

For several decades, in almost all developed countries in various sectors of the economy there has been rapid progress in the field of nanotechnology. In this regard, research aimed at improving the instrumentation of nanotechnology has reached a new progressive level.

Of course, large-scale development of the nanoindustry is impossible without the appropriate metrological support (MO). In world practice, to obtain the most reliable and accurate results of nano-measurements, widely used scanning probe microscope (SPM), which allows three-dimensional measurements of deep nanostructures, ie structures with a depth greater than the width. The main problem that arises when performing three-dimensional measurements using SPM is the lack of communication between the horizontal and vertical steps of the sensor when bypassing the surface of the nanoobject.

The article investigates the methods of correction in the measurement of nanoobjects with a deep structure using a scanning probe microscope and developed a method of three-dimensional calibration of the sensor step size on the surface of the measuring nanoobject. The existing methods of such measurements are analyzed and it is proved that in most cases when mathematically calculating the sensor pitch in the nanometer range and subsequent digital processing of measurement results in the on-line mode, there is no connection between horizontal and vertical movements, which can lead to significant deviations between real the size of the measuring object and its digital model. A physical model of the measurement process is proposed, which consists in the fact that the microscope reflects the height of the surface in orthogonal raster form. A technique for correcting digital images of a three-dimensional surface of a nanoobject in accordance with a standard has been developed, which makes it possible to make adjustments to the obtained measurement results on-line.

Keywords: nanoobject measurements, scanning probe microscope, three-dimensional calibration technique, sensor pitch size.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Протягом декількох десятиріч практично у всіх розвинених країнах світу в різних галузях народного господарства спостерігається стрімкий прогрес в сфері нанотехнологій. У зв'язку з цим, дослідження, спрямовані на вдосконалення інструментального забезпечення нанотехнологій вийшли на новий прогресивний рівень.

Безумовно, масштабний розвиток нашої індустрії неможливий без відповідного метрологічного забезпечення (МО). У світовій практиці, для отримання найбільш достовірних та прецизійних результатів нановимірювань, широкого застосування отримав скануючий зондовий мікроскоп (СЗМ), який дозволяє проводити тривимірні вимірювання глибинних наноструктур, тобто конструкцій з глибиною, більшою за ширину. Основною проблемою, яка виникає при проведенні тривимірних вимірювань за допомогою СЗМ є відсутність встановленого зв'язку між горизонтальним і вертикальним кроками датчика при обході поверхні нанооб'єкту.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для оцінки тривимірної структури поверхні має бути відомий зв'язок між горизонтальним та вертикальним рухом датчика по поверхні вимірювального об'єкту. Так для вимірювань, що передбачають більшу шкалу довжини, доступні вказівки та методики щодо верифікації координат вимірювальних засобів з

урахуванням зв'язку між рухами в різних напрямках [1-6]. Така перевірка часто проводиться інтерферометрами, які не підходять для СЗМ [5-6]. Більшість існуючих систем СЗМ [1-3] оснащені майже симетричним пристроєм, що відповідає горизонтальним рухам $X_{p.v.}$, $Y_{p.v.}$, та іншим пристроєм, що забезпечує вертикальні рухи по $Z_{p.v.}$ з набагато меншим динамічним діапазоном. Це може призвести до значної нерівності вертикального руху відносно горизонтального.

Тому актуальною задачею стає розробка математичного опису нанорельєфу $X_{p.v.}$, $Y_{p.v.}$ і $Z_{p.v.}$ координат реальної поверхні нанооб'єкту як лінійної функції координат $X_{o.v.}$, $Y_{o.v.}$ і $Z_{o.v.}$, отриманих при вимірюванні з урахуванням зв'язку між горизонтальними і вертикальними кроками датчика.

Основні результати дослідження

Запропонована фізична модель процесу вимірювання полягає в тому, що мікроскоп відображає висоту поверхні в ортогональному растровому малюнку. Відображені координати, тобто записане цифрове зображення, є функціями умов навколишнього середовища, таких як температура T і вологість H . Ці умови навколишнього середовища впливають на механічний зв'язок між зондом і зразком, а також на чутливість ємнісного датчика відстані. Доведено [7, 8], що виправлені координати $r_{p.v.j}(X_{p.v.}, Y_{p.v.}, Z_{p.v.})$ є однозначними значеннями функції спостережуваних координат та параметрів навколишнього середовища. Це пояснюється тим, що для системи з ємнісними датчиками похибки від механічного тертя та гістерезису є несуттєвими. Модельна функція $X_{p.v.}$, $Y_{p.v.}$ і $Z_{p.v.}$ є нелінійною функцією вхідних величин а має наступний вигляд

$$\begin{aligned} X_{p.v.} &= X_{p.v.}(X_{o.v.}, Y_{o.v.}, Z_{o.v.}, T, H), \\ Y_{p.v.} &= Y_{p.v.}(X_{o.v.}, Y_{o.v.}, Z_{o.v.}, T, H), \\ Z_{p.v.} &= Z_{p.v.}(X_{o.v.}, Y_{o.v.}, Z_{o.v.}, T, H). \end{aligned} \quad (1)$$

Калібрування вздовж трьох метричних осей $X_{p.v.}=X_{p.v.}(X_{o.v.})$, $Y_{p.v.}=Y_{p.v.}(Y_{o.v.})$ і $Z_{p.v.}=Z_{p.v.}(Z_{o.v.})$, включаючи нелінійну корекцію, отримується на основі заданого технічною документацією розміру вертикального та горизонтального кроку датчика. Вплив середовища та змін у часі систематичної похибки включаються до оцінки невизначеності та визначаються за допомогою критерію Аббе тобто $X_{p.v.}=X_{p.v.}(T, H, \dots)$. Зв'язок між рухом $X_{p.v.}$ і $Y_{p.v.}$, тобто $Y_{p.v.}=Y_{p.v.}(X_{o.v.}, Y_{o.v.})$, розглядався за допомогою двовимірної решітки з відомим кутом. Зв'язок між $Z_{p.v.}=Z_{p.v.}(X_{o.v.}^2, Z_{p.v.})$ і $Z_{p.v.}=Z_{p.v.}(Y_{o.v.}^2, Z_{p.v.})$ встановлюється за допомогою плоскої опорної площини, однак зв'язок між вертикальним і горизонтальним рухом, тобто $Z_{p.v.}=Z_{p.v.}(X^2, Z_{p.v.})$ і $Z_{p.v.}=Z_{p.v.}(Y_{p.v.}^2, Z_{p.v.})$ лишається невизначеним. Розглянемо це питання більш детально.

Одиничні вектори в системі координат мікроскопа ($\underline{f}_{X_{o.v.}}$, $\underline{f}_{Y_{o.v.}}$, $\underline{f}_{Z_{o.v.}}$) - це напрямки та відстані, якими рухається датчик для зміни індикації однієї одиниці довжини в напрямку швидкого сканування, $\underline{f}_{X_{o.v.}}$, у напрямку повільного сканування $\underline{f}_{Y_{o.v.}}$, та напрямку висоти $\underline{f}_{Z_{o.v.}}$. Метрична система координат ($\underline{f}_{X_{p.v.}}$, $\underline{f}_{Y_{p.v.}}$, $\underline{f}_{Z_{p.v.}}$) - це ортогональна система координат, де довжина трьох одиничних векторів виражається через одиницю SI помножену на довжину. Елементи матриці $\underline{m}_{X_{p.v.}Z_{o.v.}}$ і $\underline{m}_{Z_{p.v.}Z_{o.v.}}$ - це проекція $\underline{f}_{Z_{o.v.}}$ на площину, що охоплюється $\underline{f}_{X_{p.v.}}$ і $\underline{f}_{Y_{p.v.}}$. Елементи матриці $\underline{m}_{Y_{p.v.}Z_{o.v.}}$ - це проекція $\underline{f}_{Z_{o.v.}}$ на площину, що охоплюється $\underline{f}_{Y_{p.v.}}$ та $\underline{f}_{X_{p.v.}}$. (рис.1).

Елементи матриці $\underline{m}_{X_{p.v.}Z_{o.v.}}$ і $\underline{m}_{Z_{p.v.}Z_{o.v.}}$ є координатами проекції $\underline{e}_{Z_{o.v.}}$ на площину, що охоплюється проекціями $\underline{f}_{X_{p.v.}}$ та $\underline{f}_{Z_{p.v.}}$. Аналогічно, матричні елементи $\underline{m}_{Y_{p.v.}Z_{o.v.}}$ та $\underline{m}_{Z_{p.v.}Z_{o.v.}}$ є координатами проекції $\underline{f}_{Z_{o.v.}}$ на площину, що охоплюється $\underline{f}_{Y_{p.v.}}$ та $\underline{f}_{Z_{p.v.}}$. Ігноруючи вплив середовища, лінійне перетворення між спостережуваними положеннями $r_{o.v.}=(X_{o.v.}, Y_{o.v.}, Z_{o.v.})$ та еквівалентними значеннями в метричній системі координат може бути записано як

$$\begin{pmatrix} X_{p.s.} \\ Y_{p.s.} \\ Z_{p.s.} \end{pmatrix} \cong \begin{pmatrix} \left. \frac{\partial X_{p.s.}}{\partial X_{o.s.}} \right|_{r_{o.s.}=(0,0,0)} & \left. \frac{\partial Y_{p.s.}}{\partial X_{o.s.}} \right|_{r_{o.s.}=(0,0,0)} & \left. \frac{\partial Z_{p.s.}}{\partial X_{o.s.}} \right|_{r_{o.s.}=(0,0,0)} \\ 0 & \left. \frac{\partial X_{p.s.}}{\partial Y_{o.s.}} \right|_{r_{o.s.}=(0,0,0)} & \left. \frac{\partial Z_{p.s.}}{\partial Y_{o.s.}} \right|_{r_{o.s.}=(0,0,0)} \\ 0 & 0 & \left. \frac{\partial Z_{p.s.}}{\partial Z_{o.s.}} \right|_{r_{o.s.}=(0,0,0)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{o.s.} \\ Y_{o.s.} \\ Z_{o.s.} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{X_{p.s.}X_{o.s.}} & C_{X_{p.s.}Y_{o.s.}} & C_{X_{p.s.}Z_{o.s.}} \\ 0 & C_{Y_{p.s.}X_{o.s.}} & C_{Y_{p.s.}Y_{o.s.}} \\ 0 & 0 & C_{Z_{p.s.}Z_{o.s.}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{o.s.} \\ Y_{o.s.} \\ Z_{o.s.} \end{pmatrix} \quad (2)$$

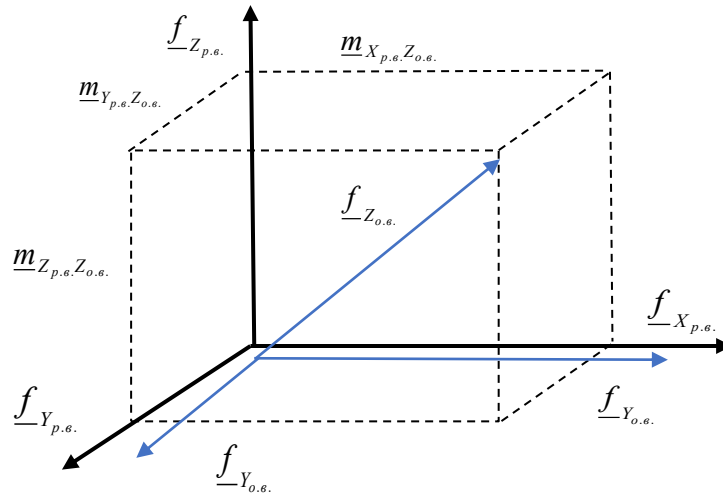


Рис. 1. Одиничні вектори в системі координат мікроскопа

У цьому випадку, часткові похідні будуть залежати від $X_{o.v.}$, $Y_{o.v.}$, та $Z_{o.v.}$ нелінійним способом, а точкою оцінки $r_{o.v.}=(X_{o.s.}, Y_{o.s.}, Z_{o.s.})$. Слід підкреслити, що матричне перетворення - це представлення функції у вигляді нескінченної суми доданків, які обчислюються зі значень похідних функцій в одній точці та наближення до першого порядку ряду Тейлора для кожної координати.

Елементи матриці $m_{X_{p.s.}X_{o.s.}}$, $m_{Y_{p.s.}Y_{o.s.}}$ і $m_{Z_{p.s.}Z_{o.s.}}$ введені для корегування лінійних показників вимірної решітки, $m_{X_{p.s.}X_{o.s.}}$. Вони вносять корекцію у відображенні координат $X_{p.s.}$ і $Y_{p.s.}$ в горизонтальній площині, а саме: $m_{Y_{p.s.}Z_{o.s.}}$ і $m_{X_{p.s.}Z_{o.s.}}$ є корегуючими для зв'язку між вертикальною та горизонтальною площинами. Оскільки одиничний вектор $f_{X_{o.s.}}$ у напрямку $X_{p.s.}$ метричної системи координат є паралельним одиничному вектору $f_{X_{o.s.}}$ та одиничному вектору $f_{Y_{o.s.}}$ в напрямку $Y_{p.s.}$ метричної системи координат площині, що охоплюється векторами $f_{X_{o.s.}}$ і $f_{Y_{o.s.}}$, то три елементи матриці в рівнянні (2) будуть дорівнювати 0.

Коли метрична система координат $(X_{o.v.}, Y_{o.v.}, Z_{o.v.})$ обрана таким чином, що вісь x паралельна фактичній осі x' мікроскопа, а вісь y – фактичній осі $Y_{o.v.}$, зв'язок може бути інтерпретований виключно як прекоос уздовж осей x' та $Y_{o.v.}$, як показано на рис. 2., та може бути виправлений проведенням корекції отриманого цифрового зображення вимірювального нанооб'єкту.

На рис.2 суцільною лінією показано справжню форму нанооб'єкту; пунктирною лінією показано фактично записаний у цифровому відображенні рельєф нанооб'єкту; α і β – фізичні бічні кути вимірювального об'єкту; $\eta_{\alpha 1.o.s.}$ та $\eta_{\beta 1.o.s.}$ – записані кути сторін нанооб'єкту. Кут перекоосу $\phi_{X_{p.s.}Z_{o.s.}}$ можна визначити у нанооб'єктів, що мають чітко визначені бічні кути.

Проведені дослідження [9, 10] свідчать про те, що якість та рівномірність бічних сторін є достатньою. Аналіз проводиться по одній парі осей за один раз, що зводить задачу до двох вимірювань. Коли досліджується зв'язок між осями x' та $Z_{o.v.}$, бічні осі зрешта вирівнюються з віссю $Y_{o.v.}$. Аналогічно, коли досліджується зв'язок між осями $Y_{p.v.}$ та $Z_{o.v.}$, хребти вирівнюються за віссю $X_{o.v.}$. Кожна сторона вимірювального нанооб'єкту характеризується вектором, який спрямований уздовж бокової сторони. Після

корекції перекосу осей у цифровому зображенні, слід кут між векторами кожної сторони у зображенні вимірюваного об'єкту зберігати незалежно від того, як орієнтується сам об'єкт нановимірювань. Зв'язок між осями $X_{o.v.}$ та $Z_{o.v.}$, може бути вимірний, порівнявши два зображення, зроблені з хребтами, паралельними $Y_{o.v.}$, але зі зразком, обернутим на 180° навколо вертикальної осі між вимірюваннями.

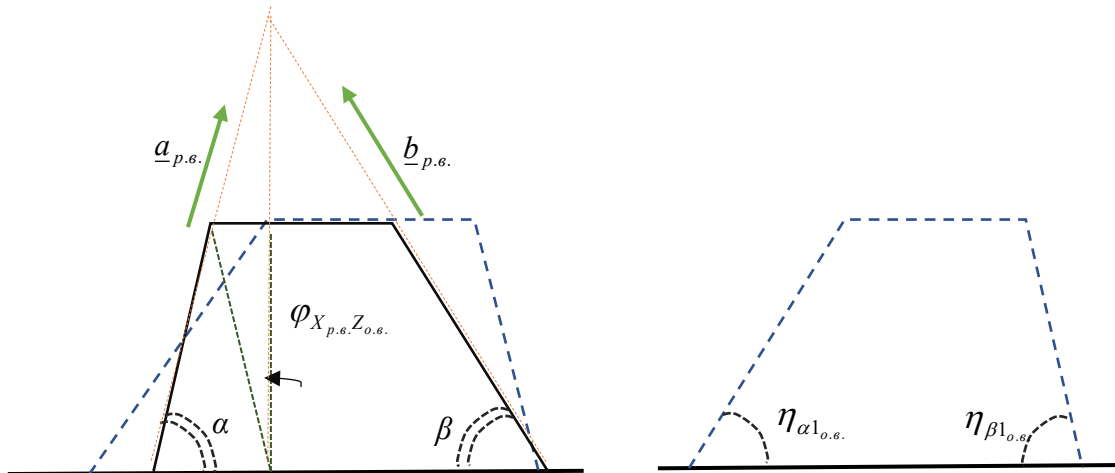


Рис. 2. Перекос метричної системи координат мікроскопа уздовж осей $X_{o.v.}$ та $Y_{o.v.}$

Позначимо бічні вектори отриманого зображення як $a_{n.o.s.}$, $b_{n.o.s.}$, де $n=1, 2$ посилається на два вимірювання, виконані з різною орієнтацією вибірки, тобто по одному вимірюванню перед і після зразка обертається на 180° у межах бічної площини (рис. 3). На рис. 3-г фізична решітка була повернена на 180° у бічній площині, а нахил фізичного кута α пов'язаний з вектором бічної стінки $b_{2.o.s.}$.

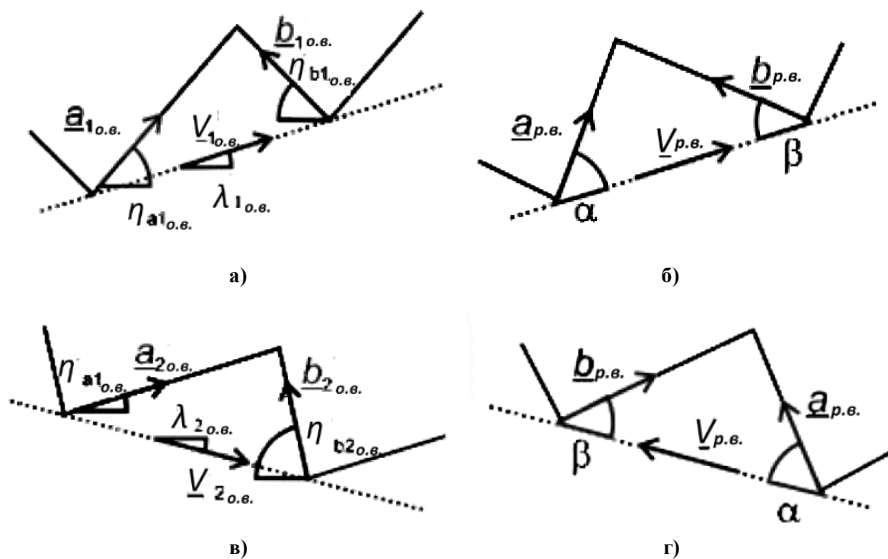


Рис. 3. Зображення нанорельєфу вимірювального об'єкту: (а) та (в) – представлення результатів вимірювання у цифровому зображенні; обидва нанорельєфи перекошені однаково та в одному напрямку; (б) і (г) - фактичний рельєф вимірювального нанооб'єкту.

Координати бічних векторів ($X_{o.v.}$, $Y_{o.v.}$, $Z_{o.v.}$) без проведення корекції у системі координат мікроскопа виражаються як функції спостережуваних бічних кутів $\eta_{a1.o.s.}$, $\eta_{b1.o.s.}$, $\eta_{a2.o.s.}$, $\eta_{b2.o.s.}$, тобто

$$\underline{a}'_1 = \begin{pmatrix} \text{ctg}\eta_{a1.o.s.} \\ 1 \end{pmatrix}, \underline{b}'_1 = \begin{pmatrix} \text{ctg}\eta_{b1.o.s.} \\ 1 \end{pmatrix}, \underline{a}'_2 = \begin{pmatrix} \text{ctg}\eta_{a2.o.s.} \\ 1 \end{pmatrix}, \underline{b}'_2 = \begin{pmatrix} \text{ctg}\eta_{b2.o.s.} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Базовий вектор $V_{n.o.s.}$ - вектор уздовж нижньої (або верхньої точки) нанорельєфу, заданих

спостережуваним нахилом $\lambda_{1_{o.e.}}$ і $\lambda_{2_{o.e.}}$, як

$$V_{-1_{o.e.}} = \begin{pmatrix} 1 \\ tg\lambda_{1_{o.e.}} \end{pmatrix}, V_{-2_{o.e.}} = \begin{pmatrix} 1 \\ tg\lambda_{2_{o.e.}} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Відкориговані бічні вектори можна отримати з вимірних бічних векторів, використовуючи перетворення, наведене у рівнянні. (2). Перетворення \underline{T} в перший порядок у двовимірному аналізі задане методом

$$\underline{T} = \begin{pmatrix} \underline{m}_{X_{p.e.}X_{o.e.}} & \underline{m}_{X_{p.e.}Z_{o.e.}} \\ 0 & \underline{m}_{Z_{p.e.}Z_{o.e.}} \end{pmatrix} \text{ або } \underline{T} = \begin{pmatrix} \underline{m}_{Y_{p.e.}Y_{o.e.}} & \underline{m}_{Y_{p.e.}Z_{o.e.}} \\ 0 & \underline{m}_{Z_{p.e.}Z_{o.e.}} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

У метричній системі координат відкориговані бічні вектори позначаються як $a_{n_{p.e.}}$ та $b_{n_{p.e.}}$, де позначення $n=1, 2$ відноситься до двох вимірювань, проведених з різною орієнтацією вибірки. Отримуємо наступні рівняння

$$\underline{a}_{1_{p.e.}} = \underline{T}\underline{a}_{1_{o.e.}}, \underline{b}_{1_{p.e.}} = \underline{T}\underline{b}_{1_{o.e.}}, \underline{a}_{2_{p.e.}} = \underline{T}\underline{a}_{2_{o.e.}}, \underline{b}_{2_{p.e.}} = \underline{T}\underline{b}_{2_{o.e.}}, V_{-1} = \underline{T}V_{-1_{o.e.}}, f_2 = \underline{T}V_{-2_{o.e.}}. \quad (6)$$

Бічні вектори $\underline{a}_{2_{p.e.}}$ та $\underline{b}_{2_{p.e.}}$ позначають відповідно ліву і праву сторони вимірювального об'єкту, але, оскільки зразок повернутий на 180° , $\underline{a}_{2_{p.e.}}$ та $\underline{b}_{2_{p.e.}}$ є перетворенням вихідних $\underline{b}_{o.e.}$ і $\underline{a}_{o.e.}$ сторони зразка (рис. 3). Якщо вимірюються обидва бічні вектори $\underline{a}_{p.e.}$ і $\underline{b}_{p.e.}$, можна записати два обмеження (7), (8): два виправлені вимірювання однакових фізичних кутів α або β повинні бути однаковими в метричній системі координат:

$$ctg\alpha = \frac{\underline{a}_{1_{p.e.}} \times V_1}{\underline{a}_{1_{p.e.}} \times \hat{V}_1} = \frac{\underline{a}_{2_{p.e.}} \times V_2}{\underline{a}_{2_{p.e.}} \times \hat{V}_2}, \quad (7)$$

$$ctg\beta = \frac{\underline{b}_{1_{p.e.}} \times V_1}{\underline{b}_{1_{p.e.}} \times \hat{V}_1} = \frac{\underline{b}_{2_{p.e.}} \times V_2}{\underline{b}_{2_{p.e.}} \times \hat{V}_2}, \quad (8)$$

Замінивши вирази (3) - (6) на рівняння (7) і (8), ми отримуємо два рівняння, кожне з яких можна розв'язати для $\underline{m}_{X_{p.e.}Z_{o.e.}}$, припускаючи, що $\underline{m}_{X_{p.e.}X_{o.e.}}$ і $\underline{m}_{Z_{p.e.}Z_{o.e.}}$ відомі априорно. Загалом, два рівняння мають різні рішення для $\underline{m}_{X_{p.e.}Z_{o.e.}}$, які можна об'єднати до одного рішення шляхом усереднення. Альтернативно, віднімаючи два обмеження (7) та (8), вони можуть бути об'єднані в єдине обмеження для різниці $ctg(\alpha) - ctg(\beta)$, яке може бути розв'язане щодо $\underline{m}_{X_{p.e.}Z_{o.e.}}$.

$$\underline{m}_{X_{p.e.}Z_{o.e.}} = \underline{m}_{X_{p.e.}Z_{o.e.}} \left(\eta_{a1_{o.e.}}, \eta_{b1_{o.e.}}, \eta_{a2_{o.e.}}, \eta_{b2_{o.e.}}, tg\lambda_{1_{o.e.}}, tg\lambda_{2_{o.e.}}, \underline{m}_{X_{p.e.}X_{o.e.}}, \underline{m}_{Z_{p.e.}Z_{o.e.}} \right) \quad (9)$$

Аналогічно, коефіцієнт зв'язку $\underline{m}_{Y_{p.e.}Z_{o.e.}}$ можна визначити як

$$\underline{m}_{Y_{p.e.}Z_{o.e.}} = \underline{m}_{Y_{p.e.}Z_{o.e.}} \left(\eta_{a1_{o.e.}}, \eta_{b1_{o.e.}}, \eta_{a2_{o.e.}}, \eta_{b2_{o.e.}}, tg\lambda_{1_{o.e.}}, tg\lambda_{2_{o.e.}}, \underline{m}_{Y_{p.e.}Y_{o.e.}}, \underline{m}_{Z_{p.e.}Z_{o.e.}} \right). \quad (10)$$

Повне аналітичне рішення для $\underline{m}_{X_{p.e.}Z_{o.e.}}$ наступне

$$\underline{m}_{X_{p.e.}Z_{o.e.}} = -\frac{2C}{B + \sqrt{B^2 - 4AC}}, \quad (11)$$

де:

$$A = \frac{1}{\underline{m}_{X_{p.e.}X_{o.e.}}} \left(\frac{tg\lambda_{1_{o.e.}}}{1-k_1} + \frac{tg\lambda_{1_{o.e.}}}{1-k_2} + \frac{tg\lambda_{2_{o.e.}}}{1-k_3} + \frac{tg\lambda_{2_{o.e.}}}{1-k_4} \right), \quad (12)$$

$$B = \left(\frac{1+k_1}{1-k_1} + \frac{1+k_2}{1-k_2} + \frac{1+k_3}{1-k_3} + \frac{1+k_4}{1-k_4} \right), \quad (13)$$

$$C = \underline{m}_{Z_{p.e.}Z_{o.e.}}^2 \cdot A + \underline{m}_{X_{p.e.}X_{o.e.}} \left(\frac{ctg\eta_{a1_{o.e.}}}{1-k_1} - \frac{ctg\eta_{b1_{o.e.}}}{1-k_2} + \frac{ctg\eta_{a2_{o.e.}}}{1-k_3} - \frac{ctg\eta_{b2_{o.e.}}}{1-k_4} \right), \quad (14)$$

$$k_1 = tg\lambda_{1_{o.e.}} \cdot ctg\eta_{a1_{o.e.}}, \quad k_2 = tg\lambda_{1_{o.e.}} \cdot ctg\eta_{b1_{o.e.}},$$

$$k_3 = tg\lambda_{2_{o.e.}} \cdot ctg\eta_{a2_{o.e.}}, \quad k_4 = tg\lambda_{2_{o.e.}} \cdot ctg\eta_{b2_{o.e.}}. \quad (15)$$

Якщо вважати, що $\lambda_{1_{o.e.}} = \lambda_{2_{o.e.}} = 0$, то $k_1 - k_2 - k_3 - k_4 = 0$, з чого випливає, що

$$A = 0, \quad B = 4, \quad C = \underline{m}_{X_{p.e.}X_{o.e.}} (ctg\eta_{a1_{o.e.}} - ctg\eta_{b1_{o.e.}} + ctg\eta_{b2_{o.e.}} - ctg\eta_{a2_{o.e.}}) \quad (16)$$

В ідеальному випадку, коли фізичні кути між базовими векторами \underline{V}_1 та \underline{V}_2 вимірювального зразка та віссю $X_{o.e.}$ мікроскопа дорівнюють 0, тобто $\lambda_{1_{o.e.}} = \lambda_{2_{o.e.}} = 0 \dots$, розрахунок відхилення кута (11) зводиться до наступного:

$$\underline{m}_{X_{p.e.}Z_{o.e.}} = \frac{\underline{m}_{X_{p.e.}X_{o.e.}}}{4} (ctg\eta_{a1_{o.e.}} - ctg\eta_{b1_{o.e.}} + ctg\eta_{b2_{o.e.}} - ctg\eta_{a2_{o.e.}}). \quad (17)$$

Нехай одиничний вектор $\underline{f}_{Z_{o.e.}}$ в системі координат мікроскопа проектується на площину, що охоплюється $\underline{f}_{X_{p.e.}}$ та $\underline{f}_{Z_{p.e.}}$. Кут між цим вектором і метричною віссю $Z_{p.e.}$ вздовж $\underline{f}_{Z_{o.e.}}$ визначається як кут нерівності $\varphi_{Z_{p.e.}X_{o.e.}}$ осей $X_{o.e.}$ та $Z_{o.e.}$; кут перекосу $\varphi_{Y_{p.e.}Z_{o.e.}}$ визначається аналогічно для осей $Y_{o.e.}$ та $Z_{o.e.}$. Тобто,

$$tng(\varphi_{X_{p.e.}Z_{o.e.}}) \equiv -\frac{\underline{m}_{X_{p.e.}Z_{o.e.}}}{\underline{m}_{Z_{p.e.}Z_{o.e.}}}, \quad tng(\varphi_{Y_{p.e.}Z_{o.e.}}) \equiv -\frac{\underline{m}_{Y_{p.e.}Z_{o.e.}}}{\underline{m}_{Z_{p.e.}Z_{o.e.}}}. \quad (18)$$

Це означає, що за допомогою всіх наборів координат $(X_{o.e.}, Z_{o.e.})$, можна визначити значення відхилення $Z_{o.e.}$ $\tan(\varphi_{X_{p.e.}Z_{o.e.}})$ вздовж осі $X_{o.e.}$. Для того, щоб цифрове зображення вимірювального нанооб'єкту повністю відповідало розмірам еталонного, для всіх координат $(X_{o.e.}, Z_{o.e.})$ повинна проводитись корекція на кут перекосу у зворотному напрямку, а матричному елементу $\underline{m}_{X_{p.e.}Z_{o.e.}}$ слід присвоїти значення

$$\underline{m}_{X_{p.e.}Z_{o.e.}} = -tng(\varphi_{X_{p.e.}Z_{o.e.}}) \underline{m}_{Z_{p.e.}Z_{o.e.}}.$$

Той самий принцип застосовується і для зв'язку між осями $Y_{o.e.}$, і $Z_{o.e.}$, де відповідний елемент правки

позначається циклом. Кут перекошу тепер може бути виражений як $C_{Y_{p.s.}, Z_{o.s.}}$, а кут нерівності, як

$$\varphi_{X_{p.s.}, Z_{o.s.}} = \arctng \left(\frac{C_{X_{p.s.}, X_{o.s.}}}{4C_{Z_{p.s.}, Z_{o.s.}}} (ctg\eta_{a1_{o.s.}} - ctg\eta_{b1_{o.s.}}) + ctg\eta_{b2_{o.s.}} - ctg\eta_{a2_{o.s.}} \right). \quad (19)$$

Якщо кути $\lambda_{1_{p.s.}}$ та $\lambda_{2_{p.s.}}$ між векторами базової лінії та віссю $X_{o.s.}$ мікроскопа досить малі, можуть проводитись наступні наближення:

$$\underline{m}_{X_{p.s.}, Z_{o.s.}} \cong \frac{m_{X_{p.s.}, X_{o.s.}}}{4} (ctg(\eta_{a1_{o.s.}} - \lambda_{1_{o.s.}}) - ctg(\eta_{b1_{o.s.}} - \lambda_{1_{o.s.}})) + ctg(\eta_{b2_{o.s.}} - \lambda_{2_{o.s.}}) - ctg(\eta_{a2_{o.s.}} - \lambda_{2_{o.s.}}), \quad (20)$$

$$\varphi_{X_{p.s.}, Z_{o.s.}} \cong \arctng \left(\frac{m_{X_{p.s.}, X_{o.s.}}}{4m_{Z_{p.s.}, Z_{o.s.}}} (ctg(\eta_{a1_{o.s.}} - \lambda_{1_{o.s.}}) - ctg(\eta_{b1_{o.s.}} - \lambda_{1_{o.s.}})) + ctg(\eta_{b2_{o.s.}} - \lambda_{2_{o.s.}}) - ctg(\eta_{a2_{o.s.}} - \lambda_{2_{o.s.}}) \right). \quad (21)$$

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Для оцінки тривимірної структури поверхні має бути відомий зв'язок між горизонтальним та вертикальним рухом датчика по поверхні вимірювального об'єкту. Запропонована фізична модель процесу вимірювання полягає в тому, що мікроскоп відображає висоту поверхні в ортогональному растровому малюнку. У цьому випадку, часткові похідні будуть залежати від $X_{o.s.}$, $Y_{o.s.}$, та $Z_{o.s.}$ нелінійним способом, а точкою оцінки $L_{o.s.} = (X_{o.s.}, Y_{o.s.}, Z_{o.s.})$. На основі серії вимірювань нанооб'єктів з глибинною структурою було розраховано елементи матриці $\underline{m}_{X_{p.s.}, Z_{o.s.}}$ та $\underline{m}_{Y_{p.s.}, Z_{o.s.}}$, що описують зв'язки між $X_{p.s.}$, $Y_{p.s.}$ та $Z_{p.s.}$ координатами. Калібрування $\underline{m}_{X_{p.s.}, Z_{o.s.}}$ та $\underline{m}_{Y_{p.s.}, Z_{o.s.}}$ вимагає, щоб інші коефіцієнти перетворення матриці (2) були оцінені, але для оцінки $\underline{m}_{X_{p.s.}, Z_{o.s.}}$ та $\underline{m}_{Y_{p.s.}, Z_{o.s.}}$ не потрібно, щоб кут на еталонному зразку нанооб'єкту був відомий. Отже, розроблена методика дає можливість виправити будь-які цифрові зображення тривимірної поверхні нанооб'єкту у відповідності з еталонном та вносити коригування отриманих результатів вимірювання в on-line режимі.

References

1. Nanosurf. Atomic force microscopy applications [Електронний ресурс] / Nanosurf – Режим доступу до ресурсу: <https://www.nanosurf.com/en/>.
2. Equipment for real-time industrial applications [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.digital-instruments.com/>.
3. AZOnano [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.azonano.com/>.
4. Patent №: 8941057. Probe and method for obtaining three-dimensional compositional maps of a biological sample / Sriram Subramaniam; the United States of America, as represented by the Secretary, Department of Health and Human Services. – № US 8941057; Filed 04.09, 2008 published 27.01.2015.
5. Patent №: US 8,739,309 B2. Method and apparatus of operating a scanning probe microscope / Yan Hu, Shuiqing Hu, Chanmin Su; Current Assignee Veeco Instruments Inc Bruker Nano Inc. – № US 2010/O122385 A1; Filed May 13, 2010 published May 27, 2014, U.S. Cl. USPC. 850/5/
6. Patent No.: US20070012095A1. Scanning probe microscope / Katsuyuki Suzuki; Jeol Ltd. – № 11/481,401; Filed 05.07.2006 published 18.01.2007, Tokyo (JP). USPC. 850/5
7. J. Garnaes L. Twodimensional nanometer scale calibration based on one-dimensional gratings / Garnaes L., Nielsen K., Dirscherl, J.F. Jorgensen, J. B. Rasmussen, P. E. Lindelof, C. B. Jorgensen // Appl. Phys. A 66, 1998, P 831–835.
8. Jorgensen J. F. Lateral metrology using scanning probe microscopes, 2D pitch standards and image processing / J. F. Jorgensen, C. P. Jensen, and J. Garnaes // Appl. Phys. A 66, 1998, P 847–852
9. Garnaes J. Calibration of step heights and roughness measurements with atomic force microscopes / J. Garnaes, N. Kofod, A. K_hle, C. Nielsen, K. Dirscherl, L. Blunt // Precision Eng. 27, 2003. P 91–98.
10. The Scanning Probe Image Processor (SPIP) [Електронний ресурс] // Image Metrology, Denmark – Режим доступу до ресурсу: www.imagemet.com.