

РОЗРОБКА МЕТОДУ УСУНЕННЯ ДРЕЙФУ ПРИ ВИМІРЮВАННІ НАНООБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ

Впродовж останнього десятиріччя в експериментальній фізиці характеризується інтенсивним розвитком принципово нових методів вивчення поверхонь з нанометровим і атомарним просторовим дозволом. Скануюча зондова мікроскопія (СЗМ) - один із потужних сучасних методів дослідження морфології і локальних властивостей поверхні твердого тіла з високим просторовим дозволом.

Метою мікроскопічного дослідження твердих тіл СЗМ є отримання збільшеного зображення поверхні вимірювального нанооб'єкту. Незважаючи на можливість досягнення високого просторового дозволу, інформація про рельєф досліджуваної поверхні може неадекватно відображати реальні особливості поверхні, що є наслідком впливу на вимірювальний об'єкт дрейфу скануючого зонду, що призводить до появи артефактів. Ці артефакти, як правило, легко враховуються на якісному рівні при інтерпретації СЗМ-результатів, однак специфіка ряду завдань може вимагати кількісних оцінок і методів відновлення реальної геометрії об'єктів. Частково артефакти зображень СЗМ можна видалити за допомогою програмних засобів, використовуючи фільтри різних типів.

Для отримання повноцінного растрового зображення використовують різні пристрої розгортки по осях X і Y , наприклад, пьезотрубки, плоскопаралельні сканери. Зображення поверхневої топографії в СЗМ формується двома способами. У режимі постійного струму зонд рухається по поверхні, виконуючи растрове сканування. Під час цього процесу сигнал напруги, який застосовується до Z -електроду п'єзоелементу в схемі зворотного зв'язку, зберігаючи постійну дистанцію з високою точністю, записується в комп'ютерну пам'ять, як функція $Z = f(x, y)$, і пізніше розпізнається за допомогою комп'ютерної графіки. Доведено, що дрейф у z -напрямку може розглядатися як малокорельовану до xy площину.

Отже, вплив z -дрейфу може бути усунений перетворенням оригінальних цифрових зображень на градієнтні [1-3]. Для компенсації впливу z -дрейфу рекомендовано зіставити два цифрових зображення нанооб'єкту, зроблених у різний час:

$$h_{k+1}(x, y) = h_k(x + \Delta x_k, y + \Delta y_k) + \Delta z_k, \quad (1)$$

де $\Delta x_k, \Delta y_k, \Delta z_k$ - дрейф у напрямках x, y, z між двома часами k та $k + 1$.

Градiєнт x -напрямку вимірювань можна обчислити як:

$$g_x(x, y) = h_k(x, y) - h_k(x - 1, y), \quad g_x(x, y) = h_k(x, y) - h_k(x, y - 1), \quad (2), (3)$$

Підставивши (1) у (2) та (3), ми можемо отримати:

$$g_{k+1}(x, y) = h_{k+1}(x, y) - h_{k+1}(x - 1, y) = h_k(x + \Delta x_k, y + \Delta y_k) + \Delta z_k - (h_k(x + \Delta x_k - 1, y + \Delta y_k) + \Delta z_k) = g_{kx}(x + \Delta x_k, y + \Delta y_k), \quad (4)$$

$$g_{k+1}(x, y) = h_{k+1}(x, y) - h_{k+1}(x, y - 1) = h_k(x + \Delta x_k, y + \Delta y_k) + \Delta z_k - (h_k(x + \Delta x_k, y + \Delta y_k - 1) + \Delta z_k) = g_{ky}(x + \Delta x_k, y + \Delta y_k). \quad (5)$$

Потім усувається зсув у напрямку z . Експериментально доведено, що використання методу фазової кореляції для вимірювання зміщення двох градієнтних зображень є більш ефективним, ніж використання вихідних зображень. Крім того, у двох послідовних градієнтних зображень, топографічних змін немає. Використовуючи властивість зсуву перетворення Фур'є, метод фазової кореляції може перетворити зсув просторової області на різницю фаз у частотній області.

Ми можемо описати пару послідовних зображень як $h_k(x, y)$ і $h_{k+1}(x, y)$, а їх градієнти - $g_k(x, y)$ і $g_{k+1}(x, y)$ відповідно. Фур'є-перетворення $h_k(x, y)$ і $h_{k+1}(x, y)$ є $H_k(f_x, f_y)$ і $H_{k+1}(f_x, f_y)$. Припускаючи, що є зсув переміщення $(\Delta x, \Delta y)$ між двома послідовними зображеннями, зв'язок між двома перетвореннями Фур'є зображень записується як:

$$H_{k+1}(f_x, f_y) = H_k(f_x, f_y) \exp[-j2\pi(\Delta x f_x + \Delta y f_y)]. \quad (6)$$

Перехресною кореляційною функцією двох кадрів є

$$c_{k,k+1}(x, y) = \xi^{-1}(H_k(f_x, f_y)H_{k+1}(f_x, f_y)) = \delta(x - \Delta x, y - \Delta y). \quad (7)$$

Оскільки для того, щоб усунути дрейф напрямку z , використовуються градієнтні зображення. Тоді (7) можна переписати як

$$c_{k,k+1}(x, y) = \xi^{-1}(G_k(f_x, f_y)G_{k+1}(f_x, f_y)) = \delta(x - \Delta x, y - \Delta y). \quad (8)$$

У (8) $G_k(f_x, f_y)$ і $G_{k+1}(f_x, f_y)$ є двовимірним дискретним перетворенням Фур'є $g_k(x, y)$ і $g_{k+1}(x, y)$ відповідно.

ξ^{-1} позначає зворотне перетворення Фур'є та позначає складну спряжену. Рівняння (7) також є імпульсною функцією в площині xy , а рівняння є оцінкою дрейфу між двома послідовними кадрами. За допомогою цього методу можна з високою вірогідністю розрахувати зміщення дрейфу та ввести автоматичну корекцію, що надасть можливість отримати більш точну вимірювальну інформацію про рельєф поверхні нанооб'єкту.