

УДК 537.533.35:578.72

Мельник Ю.А. *, Шостак А.В., д.т.н. **, Синій С.В., к.т.н. *

*Луцький національний технічний університет

**Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

3D-РЕКОНСТРУКЦІЯ ПРИПОВЕРХНЕВИХ СТРУКТУР ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ РЕМ-СТЕРЕОМІКРОТОМОГРАФІЇ

Запропоновано принципово новий метод дослідження приповерхневої топології об'ємних структур твердотілих об'єктів, здійснюваний функціональними елементами технологічних комплексів. метод базується на поєднанні принципів електронної мікротомографії і стереовимірювань і передбачає реконструкцію внутрішньооб'ємної будови об'єкта за даними енергетичних спектрів відбитих електронів. У роботі здійснена спроба застосування кількісної мікротомографії за алгоритмами, розробленими для стереозображень.

Важливим моментом є те, що запропонований метод не є простим додаванням переваг двох відомих методів. Їх поєднання відкриває принципово нові можливості мікроструктурних досліджень – одержання точної кількісної інформації про внутрішню структуру твердотілого об'єкта, що дозволяє візуалізувати сховані під поверхнею внутрішньооб'ємні деталі мікронеоднорідностей, а також здійснювати кількісну реконструкцію топології об'єкта за глибиною. Це особливо важливо, наприклад, у трибоматеріалознавстві та мікроелектроніці.

Мікротомографічний метод, мікроструктура, растрова електронна мікроскопія, метод Лукаса-Кенаде, приповерхнева топологія.

Постановка проблеми. Однією з домінуючих тенденцій сучасних нанотехнологій, зокрема у матеріалознавстві, є використання растрової електронної мікроскопії (РЕМ) для одержання кількісних характеристик досліджуваних мікрооб'єктів [1]. Удосконалення технології виробництва в різних областях промисловості шляхом підвищення ефективності роботи технологічних комплексів є актуальною задачею для одержання конкурентно-здатної на світовому ринку продукції. Рішення багатьох технологічних задач, спрямованих на одержання матеріалів і продукції з поліпшеними характеристиками, неможливе без аналізу поверхні і приповерхневих шарів, одержання інформації про структуру, якісний і кількісний склад як вихідної сировини, так і одержуваних виробів. Потужним інструментом для вирішення таких задач є РЕМ, яка поєднує в собі високу роздільну здатність, можливість дослідження в різних режимах, встановлення локального якісного і кількісного елементного складу матеріалів тощо, завдяки чому забезпечується значне підвищення якості та ефективності роботи функціональних елементів технологічних комплексів.

У цьому аспекті актуальною і перспективною є спроба розширити спектр РЕМ-досліджень, інтегруючи мікротомографічний метод з фотограмметричним підходом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення цієї проблеми. За винятком робіт [2,3], інших публікацій в цьому напрямку немає.

Постановка завдання. Пропонується принципово новий спосіб обробки РЕМ-зображень – інтеграція стерео і томографічних методів у дослідженнях приповерхневих мікроструктур.

Мета: постановка і розв'язання прямої фотограмметричної задачі як теоретичної основи для кількісної РЕМ-мікроскопії діагностування мікрооб'єктів на мікронному та субмікронному рівнях для підвищення якості та ефективності роботи функціональних елементів технологічних комплексів.

Виклад основного матеріалу.

Вступ. Одержання інформації про мікрогеометрію поверхні твердих тіл необхідне для створення мікроелектронних приладів і структур функціональних елементів технологічних комплексів. У зв'язку з стійкою тенденцією до зменшення лінійних розмірів елементів таких структур особливо важливим діагностичним методом у трибоматеріалознавстві та у мікроелектроніці стає застосування растрового електронного мікроскопа (РЕМ). У РЕМ інформація про рельєф досліджуваної поверхні твердого тіла забезпечується, як правило, за рахунок реєстрації й аналізу вторинних або зворотно розсіяних електронів.

У зв'язку з цим у ряді робіт була спроба побудови наближеної моделі, але така модель має обмежене застосування, оскільки в більшості експериментальних ситуацій істотний внесок у

зображення дають повільні електрони, сформовані зворотньо-розсіяні електрони в зразку та у камері мікроскопа.

I. 3D реконструкція за даними енергетичних спектрів ЗРЕ. В роботі [4] запропонована модель ЗРЕ, що дозволяє звести задачу відновлення (реконструкції) мікрорельєфу поверхні до розв'язку інтегрального рівняння.

Аналітичним виразом для реального сигналу ЗРЕ є рівняння згортки:

$$\eta_R(x_0, y_0) = \iint_{-\infty}^{+\infty} K(x - x_0, y - y_0) \eta(x, y) dx dy, \quad (1)$$

де $\eta_R(x, y)$ – число емітованих зразком електронів у випадку реального пучка при його падінні в точку поверхні з координатами x_0, y_0 ; $\eta(x, y)$ те ж саме для нескінченно тонкого пучка; $G(x, y)$ – розподіл інтенсивності в пучку.

Ядро рівняння (1) добре апроксимується виразом виду (для простоти припустимо, що лінія сканування збігається з віссю x)

$$K(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{m} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2G^2}\right), & x < 0, m \cong 3, \\ \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2G^2}\right) & x \geq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Для чисельного розв'язку рівняння (2) можна застосовувати ітераційні процедури виду (приводимо одномірний випадок):

$$\sum_{i=1}^m K(x_i - x_j) F(f_n(x_i)) \Delta x = g(x_j), \quad f_0(x_i) = const; \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

$$K(t) = \exp\left(-t^2 / (2G^2)\right), \quad F(t) = \int_t^{\infty} \exp(-u^2/2) du, \quad g(t) = 2\pi G \frac{\eta}{1 + \eta} \quad (3)$$

Наближено можна вважати, функція $F(x, y, z)$ має вигляд:

$$F(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma^3} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2 + (z - a)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (4)$$

де a і σ – постійні, що залежать від атомного номера зразка та енергії пучка.

Як показали дослідження [5], такий підхід є некоректною за задачею і потребує, для підвищення достовірності, додаткової апріорної інформації.

II. Геометрія формування РЕМ-стереозображення при поверхневих мікроструктур. Стереопари в РЕМ зазвичай одержують зніманням об'єкта під двома кутами стосовно напрямку електронного зонда. Вибір кутів визначається умовами оптимального спостереження стереоефекту і заданої «глибини стереобачення», що залежить від особливостей досліджуваного об'єкта.

Підбором енергії електронного зонду (більше 50 KeV) є можливість генерувати електроно-диркові пари до глибини декількох десятків мікрометрів. Генеровані електронним зондом носії будуть дифундувати в приповерхневу область та, рекомбінуючи на структурних недосконало-стях, включеннях і інших дефектах матеріалу, відобразатимуть їх на зображенні в сигнал наведеного струму (НС). Це зображення є проекцією на поверхню об'єкта зміни сигналу НС, що виникає в приповерхневому шарі матеріалу. Так отримані стереофотографії будуть відображати об'ємний розподіл сигналу і пов'язане з ним просторове розміщення дефектів, включень тощо.

Нехай для кожної експозиції реєструюча плівка розміщена паралельно до падаючого про-меня x_1 і x_2 і, відповідно, під кутом α по відношенню до поверхні кристала з терпеникуляром \bar{e} . Кут стереоконвергенції – $2\beta_c$. Глибину h_c можна отримати з такої залежності:

$$h_c = \frac{\overline{a_2 b_2} \cos(\beta_c - \alpha)}{2M \sin \beta_c}, \quad (5)$$

де $\overline{a_2 b_2}$ – різниця паралаксів; M – збільшення.

III. РЕМ-стереомікротомографія. В роботі [6] запропоновано принципово новий спосіб дослідження приповерхневої топології об'ємних структур твердотільних об'єктів. Спосіб є багатообіцяючим і базується на поєднанні принципів електронної мікротомографії і стереовимірювань і передбачає реконструкцію внутрішньооб'ємної будови об'єкта за даними енергетичних спектрів відбитих електронів.

Важливим моментом в такому підході є те, що запропонований метод не є простим додаванням переваг двох відомих методів. Їх поєднання відкриває принципово нові можливості мікроструктурних досліджень – одержання точної кількісної інформації про внутрішню структуру твердотілого об'єкта.

Метод стереомікротомографії дозволяє візуалізувати сховані під поверхнею внутрішньо-об'ємні деталі мікронеоднорідностей, а також здійснювати кількісну реконструкцію топології об'єкта за глибиною. Це особливо важливо, наприклад, у трибоматеріалознавстві та в області мікроелектроніки при діагностуванні багаторівневих мікросхем, а також інших багат шарових об'єктів.

Суть методу стереомікротомографії наступна. Вибором прискорюючої напруги РЕМ (тобто глибини виходу відбитих електронів) і відповідного енергетичного вікна спектрометра (положення на енергетичній осі і ширини діапазону енергій детектуючих електронів) домагаються такої ситуації, коли досить чітко спостерігається контрастна картина всіх підповерхневих шарів. При цьому суттєвою умовою є досягнення максимально чіткої взаємної диференціації схованих границь поділу по всій глибині зондованої структури. Для більш точної реконструкції необхідно також враховувати розмиття діаметра електронного зонда по мірі проникнення первинних електронів у приповерхневий шар. Це розмиття, що визначає висотну (глибинну) роздільну здатність, обернено пропорційне прискорюючій напрузі РЕМ.

IV. Практична реалізація РЕМ-стереомікротомографії наступна. Отримані стереопари в режимі on-line переводяться в цифрові. Оцифрування здійснюється за 256 рівнями сигналу з масштабом сканування 512×512 пікселів, а потім обробляється за допомогою програми «Sterecon» [5]. Ця програма складається: із блоку ректифікації, призначеного для компенсації взаємного розвороту і зсуву стереозображень; із блоку ототожнення відповідних елементів на стереозображеннях; із блоку обчислення висот і блоку побудови тривимірних зображень аналізованого об'єкта.

Ототожнення ідентичних точок. Важливим етапом методу стереомікротомографії є ототожнення точок, обраних оператором на лівому стереозображенні з їх аналогами на правому. За відносними зсувами ототожнених пар точок (паралаксами) проводиться обчислення висот мікрорельєфу в цих точках з використанням стандартних фотограмметричних співвідношень, описаних у [7]. Ототожнення точок може здійснюватися різними способами (кореляційними, фазовими й ін.), однак для практики експрес-обробки найбільш ефективним виявився градієнтний ієрархічний метод Лукаса-Кенаде [5, 6].

Метод Лукаса-Кенаде передбачає пошук такої пари точок на стереозображеннях, які мінімізують функцію ототожнення:

$$\epsilon(v) = \epsilon(v_x, v_y) = \sum_{x=p_x-\omega_x}^{p_x+\omega_x} \sum_{y=p_y-\omega_y}^{p_y+\omega_y} [A(x, y) - B(x + v_x, y + v_y)]^2, \quad (6)$$

де $v = [v_x v_y]^T$ – вектор відносного зсуву образу точки лівого стереозображення на правому стереозображенні; x, y – координати точки-образа, p_x, p_y – наближені значення координат точки-аналога (на першому етапі можуть вибиратися довільно); ω_x, ω_y – розміри прямокутного околу, всередині якого оцінюється взаємна подібність чергової пари точок; $A(x, y), B(x, y)$ – елементи матриць розбивки зображень.

Вектор відносного зсуву, мінімізуючий функцію ототожнення, знаходиться в такий спосіб:

$$v_{\min} = G^{-1}b, \quad (7)$$

де

$$G = \sum_{x=p_x-\omega_x}^{p_x+\omega_x} \sum_{y=p_y-\omega_y}^{p_y+\omega_y} \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}, \quad b = \sum_{x=p_x-\omega_x}^{p_x+\omega_x} \sum_{y=p_y-\omega_y}^{p_y+\omega_y} \begin{bmatrix} \delta I & I_x \\ \delta I & I_y \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\delta(x, y) = A(x, y) - B(x, y), \quad (9)$$

$$I_x = \frac{\partial B}{\partial x}, \quad I_y = \frac{\partial B}{\partial y}. \quad (10)$$

Проте застосування описаного методу на практиці зустрічає ряд складностей, пов'язаних як з особливостями пропонованого градієнтного алгоритму (наприклад, необхідно, щоб матриця G була оборотною), так і з особливостями самих стереозображень (деякі ділянки мікрорельєфу, видимі на лівому стереозображенні, після нахилу навіть на невеликий кут можуть зміщуватися і ставати невидимими). Для того, щоб знайти помилково ототожені пари точок на стереозображенні, а також збільшити точність і надійність їх виявлення, використовуються наступні операції:

1. Градієнтний пошук ідентичних елементів виконується за ієрархічною схемою, яка передбачає послідовну обробку серії стереозображень з розмірностями матриць розбивки, що змінюються за правилом геометричної прогресії з показником 2, звичайно від 16×16 елементів до розмірності вихідних зображень.

2. Для кожної ототоженої пари точок проводиться перевірка симетричним пошуком. Знайдений на правому зображенні аналог точки-образу лівого зображення, у свою чергу, використовується як образ, для якого здійснюється пошук аналога на лівому зображенні. Знайдений аналог повинен збігатися з вихідною точкою-образом лівого зображення. У протилежному випадку дана пара точок вважається неправильно ототоженою.

Результатом стереорекострукції є об'ємна цифрова модель приповерхневої мікроструктури багат шарового об'єкта, яка може бути представлена у вигляді тривимірної блок-діаграми, карти ізоліній мікрорельєфу і набору поперечних січень вздовж будь-яких заданих напрямків, за якими можна визначити всі розміри аналізованого мікрооб'єкта.

Висновки.

1. Запропонований підхід уможливорює достовірну 3D-рекострукцію приповерхневих мікроструктур із просторовим розподілом дефектів у приповерхневому шарі досліджуваного матеріалу.

2. Метод стереомікροтомографії доцільно застосовувати в матеріалознавстві для дослідження і відтворення мікрорельєфу поверхні та просторового розподілу концентрації дефектів, артефактів тощо. Такі дослідження важливі в нанотехнології.

Робота виконана за підтримки МОН України (держреєстраційний номер теми №0112U000290).

1. Дицман С. А. Стереомікροтомография – новый способ изучения трехмерных микроструктур в РЭМ [Текст] / С. А. Дицман, В. Н. Мельник, Э. И. Рау, В. Н. Соколов, Д. И. Юрковец // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. – 2000. – №12. – С. 13-15.

2. Sokolov V. 3D reconstruction of surface and subsurface structures of Solids by SEM Stereo images [Text] / V. Sokolov, D. Yurkovets, V. Melnik, A. Boyde, P. Howell // Inst. Phys. Conf. Ser., Dundee. – 2001. – №168. – pp.119-122.

3. Aristov V. Signal Formation of Backscattered Electrons by Microinhomogeneities and Surface Relief in a SEM [Text] / V. Aristov, N. Dreomova, A. Firsova, V. Kazmiruk, N. Ushakov, S. Zeitsev // Scanning. – 1991. – V.13. – pp.15-22.

4. Мельник В., Шостак А. Деякі питання РЕМ-фотограмметрії наведеного струму [Текст] / В. Мельник, А. Шостак // Картографія і аерофотознімання. – 2007. – В.69. – С.129-135.

5. Sokolov V., Melnik V., Yurkovets D., Boyde A., Howell P. 3D reconstruction of surface and Subsurface structures of Solids by SEM Stereo Images // Inst. Phys. Conf. Dundee, 2001. – №168. – P/119-122.

6. Мельник В. М., Шостак А. В. Кількісна стереомікрофрактографія [Текст] / В. М. Мельник, А. В. Шостак // Луцьк: Вид. «Твердиня». 2010. – 457 с.

7. Шостак А.В. РЕМ-фотограмметрична оцінка мікрорельєфу поверхонь. [Текст] // -Вісник геодезії і картографії. –Київ, 2011. – Вип. 1. – С. 30-34.