

Інтегративна методологія нанометричної інтерпретації оцінки РЕМ-зображень, отриманих в режимі катодолюмінісценції і вторинної електронної емісії

В. Мельник¹, А. Шостак¹, Ю. Мельник^{2*}

¹Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк, Україна

²Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

*Corresponding author. E-mail: melnykjulka@gmail.com

Paper received 23.06.2016; Accepted for publication 05.07.2016.

Анотація. В статті розглянуто питання розробки взаємодоповнюючих алгоритмів нанометричної інтерпретації растрово-електронно-мікроскопічних (РЕМ) зображень, отриманих в режимі катодолюмінісценції, вторинних електронів та наведеного струму без апріорного апостоловання виду проєкції 3-D реконструкції мікротопографії поверхонь за багаторкурсними РЕМ-зображеннями та методику використання вейвлет-фільтрації для покращення якості РЕМ-зображень. Результати проведених досліджень показують, що подальше удосконалення методики може стати ефективним засобом для візуалізації та кількісної інтерпретації поверхонь твердих матеріалів

Ключові слова: Растрова електронна мікроскопія (РЕМ), РЕМ-зображення тривимірне моделювання, фільтрація, реконструкція, фільтрація, мікротопографія.

Вступ. В сучасних умовах 3D-реконструкція мікрооб'єкти досліджуваних за допомогою електронної мікроскопії просвічую чого та растрового типів є важливою нанотехнологічною задачею в області матеріало- та металознавства, біології, медицини та ін.

- Тривимірна інтерпретація РЕМ та ПЕМ зображень актуальна при моделюванні фізико-механічних властивостей багатofункціональних матеріалів;
- при застосуванні методів фрактального аналізу у дослідженні структури пористих металічних матеріалів;
- в трибології;
- у дослідженнях розроблюваних за нанотехнологіями нових полімерних та композитних матеріалів;
- для встановлення типів та характеру зломів та ін.

Аналіз останніх публікацій. Проблема морфологічного аналізу передбачає покращення радіометричних (контрастних) характеристик, розпізнавання пор (часток) та застосування коректно-достовірних алгоритмів. Дані питання досить глибоко висвітлені в роботах [1, 5, 16, 17].

В останні роки в дослідженнях з даної проблематики успішно використовують вейвлет-перетворення [3, 4, 18, 19]. Результати, отримані за допомогою таких перетворень, мають більшу інформативність та оперативність, завдяки чому можна безпосередньо обробляти такі РЕМ-зображення як за традиційного підходу аналізувати важко. На сьогодні питанням вейвлет-обробки зображень, отриманих растровою електронною чи скануючою тунельною мікроскопією, присвячено ряд робіт [1, 5, 6, 7, 8]. Питання застосування дискретних осей Вороного детально висвітлено в роботах [13, 14, 15].

Мета. Розробка взаємодоповнюючих алгоритмів нанометричної інтерпретації растрово-електронно-мікроскопічних (РЕМ) зображень, отриманих в режимі катодолюмінісценції, вторинних електронів та наведеного струму без апріорного апостоловання виду проєкції 3-D реконструкції мікротопографії поверхонь за багаторкурсними РЕМ-зображеннями.

Виклад основного матеріалу.

І. Стереолого-морфологічний аналіз РЕМ-зображень.

Подібний аналіз передбачає покращення радіометричних (контрастних) характеристик, ідентифікацію структурних елементів (пор та часток) та застосування коректно-достовірних алгоритмів кількісної інтерпретації РЕМ-зображень [1, 2, 3].

В останні роки в таких дослідженнях успішно використовують вейвлет-перетворення [4, 5]. Результати, отримані за допомогою таких перетворень, мають більшу інформативність та оперативність, завдяки чому можна безпосередньо обробляти такі РЕМ-зображення, які за традиційного підходу аналізувати важко. На сьогодні питанням вейвлет-обробки зображень, отриманих растровою електронною чи скануючою тунельною мікроскопією, присвячено ряд робіт [1, 6, 7, 8].

В теоретичному плані доцільно було б застосувати двовимірні вейвлети. Але через складність аналітичного представлення таких вейвлетів і складність розрахунків ми обмежилися одновимірними вейвлетами. Останні дозволяють суттєво послаблювати контрастні спотворення, в результаті чого більш надійно прослідковуються структурні елементи.

В РЕМ-мікроскопії найбільш важливою є цифрова фільтрація РЕМ-зображень. На практиці цифрова фільтрація зображень вейвлет-перетвореннями дозволяє застосовувати широкий спектр різноманітних вейвлетоутворюючих функцій, найвідомішими з яких є вейвлети Хаара, Добеші, Морле, Майера, «мексиканський капелюх» [4,9]. Ми скористалися вейвлетоутворюючими функціями Хаара:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & \text{at } 0 \leq t < \frac{1}{2} \\ -1 & \text{at } \frac{1}{2} \leq t < 1 \\ 0 & \text{in other cases} \end{cases} \quad (1)$$

Достатньо високу ефективність застосування вейвлет-перетворень в процесі фільтрації цифрових зображень підтверджується ґрунтовними дослідженнями [3,4].

Виділення скелетного (твердого) компонента структури мікрооб'єктів в растровій електронній мікроскопії (РЕМ) є однією з найбільш складних і актуальних задач стереолого-морфологічного аналізу [10, 11]. Основна проблема пов'язана з неоднозначністю, а в більшості випадків і неможливістю вибору оптимального рівня дискримінації, як це прийнято у широко використовуюваному пороговому методі [1, 2], за якого тверді структурні елементи виділяються на півтоновому зображенні за умов мінімальних спотворень їх розмірів і форми. Найскладніші при цьому є групи близько розміщених один до одного структурних елементів, виділення яких нестійке по відношенню до параметрів бінаризації. Як наслідок, при автоматичному стереолого-морфологічному аналізі такі групи структурних елементів можуть сприйматися як один структурний елемент, а це призводить до суттєвого спотворення результатів аналізу – завищенню числа крупних мікрооб'єктів і заниженню числа більш дрібних.

Тому особливої актуальності набуває задача коректного розподілу конгломератів структурних елементів на складові. Очевидні підходи, пов'язані із застосуванням суперпозиції базових методів математичної морфології, таких як дилатація, ерозія і інші не вирішують даної проблеми [12].

Нами спільно з науковцями МДУ ім. М. В. Ломоносова (Росія) пропонується застосовувати двовимірні полігони Вороного, які базуються на використанні дискретних осей Вороного для граничних точок структурних елементів.

Узагальнений запис діаграм Вороного такий:

$$GP_i = \{x | d(x, i) \leq d(x, j); j \in S, j \neq i\}, \quad (2)$$

де $S = S_1, S_2, \dots, S_n$ = множина n елементів на площині

$d(x, i)$ = найменша евклідова відстань від будь-якої локалізації x в площині до будь-якої точки.

При цьому центральна дискретна вісь Вороного визначається як діаграма Вороного першого порядку для граничних точок на перетині з твірною областю S :

$$DVMA(\hat{B}(S)) \stackrel{def}{=} Vor_1(\hat{B}(S)) \cap S. \quad (3)$$

Відповідно діаграма Вороного другого порядку наступна:

$$DVMA(\hat{B}(S)) \stackrel{def}{=} Vor_1(\Omega) \stackrel{def}{=} p_i \in \Omega \wedge i \neq j H(p_i, p_j), \quad (4)$$

де $H(p_i, p_j)$ = геометричне місце точок із Ω які ближчі до p_i ніж до p_j .

При такому підході центральна дискретна вісь Вороного є плоским графом, кожне ребро якого утворюється парою граничних точок.

Для того, щоб зменшити вплив дрібних деталей границі мікрооб'єкта на форму центральних дискретних осей Вороного, застосовується спеціальна процедура регуляризації отриманого графа з використанням вагових функцій оцінки залишкової різниці. Їх застосування детально висвітлено в роботах [3, 13, 14].

З метою практичної апробації були відібрані декілька зразків дисперсних порошкових матеріалів, виготовлених за принципово новими нанотехнологіями, що базуються на принципі радіальних схем пресування [15]. На рис. 1 приведені РЕМ-мікрофотографії експериментальних зразків, отриманих на РЕМ НІТАСНІ S-800, отриманих в режимах катодоліумінесценції (рис. 1 а) і вторинної електронної емісії (рис. 1 б, в) (збільшення 100, 500 і 2500 крат відповідно). Деякі результати виконаних досліджень відображені на рис. 2, зокрема розподіл пор за площею, периметрами, еквівалентними діаметрами і фактором форми. Зведені результати показані на рис. 2 г.

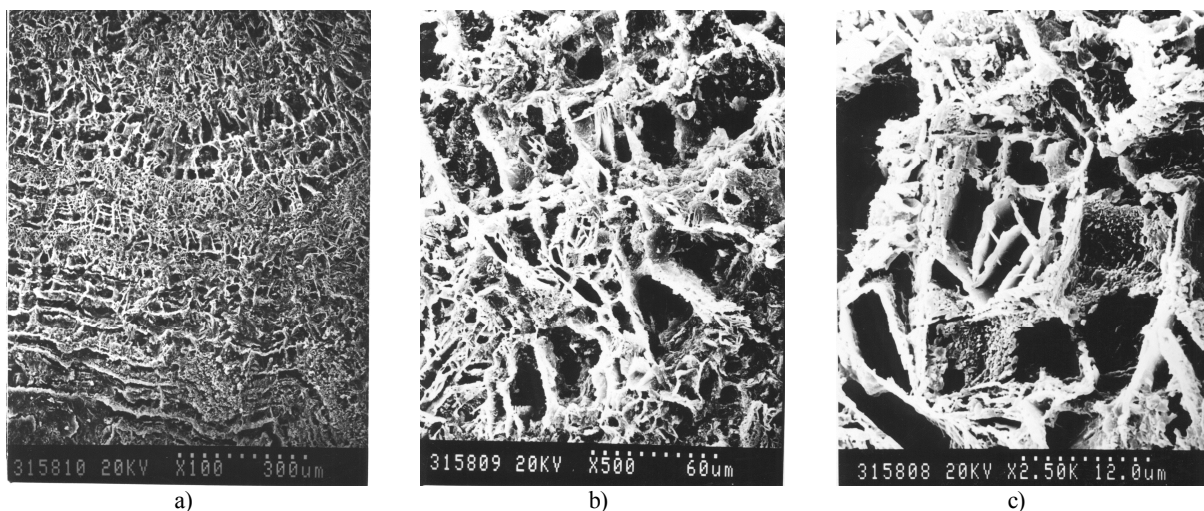
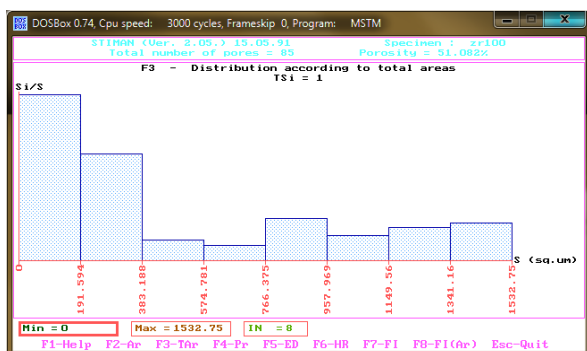


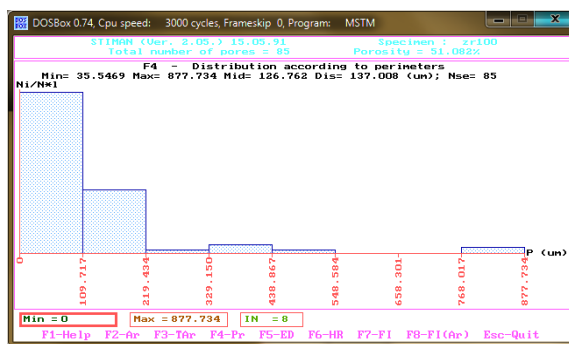
Рис. 1. а, б, в. Мікрофотографії досліджуваного зразка при збільшеннях: а) 100 \times ; б) 500 \times ; в) 2500 \times

Відповідні обчислення виконані для отримання статистичних параметрів розподілу пор (часток) здійснюється за принципами математичної морфології [5]. При таких обчисленнях аналізується характер покриття РЕМ-зображень масками розміром обчислення статистичних параметрів розподілу пор

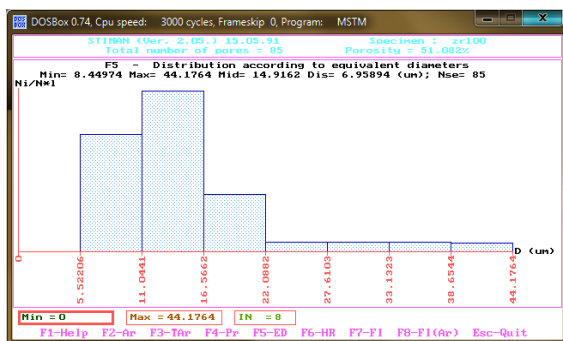
(часток) здійснюється за принципами математичної морфології [5], а саме аналізується характер покриття РЕМ-зображень масками розміром 2×2 : $SQ_0, SQ_1, SQ_2, SQ_3, SQ_4, SQ_5$, де 1,0 – піксели маски що належать, відповідно не належать, досліджуваному



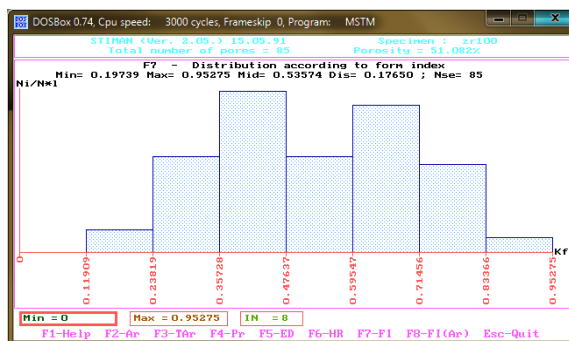
a) гістограма розподілу пор за загальними площами



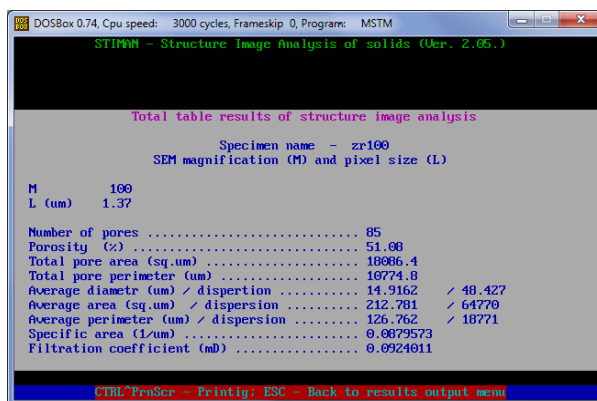
b) гістограма розподілу пор за периметрами



c) гістограма розподілу пор за еквівалентними діаметрами



d) гістограма розподілу пор за фактором форми



g) результати аналізу мікрофотографій

Рис. 2. a, b, c, d, g. Гістограмні ілюстрації обробки мікрофотографії досліджуваного зразка (збільшення 100[×]).

фрагменту PEM-зображення.

Площа A , периметр P і кількість топологічно сполучених компонентів E визначаються наступним чином [15]:

$$A = 1/8n(SQ1) + 1/4n(SQ2) + 7/8n(SQ3) + n(SQ4) + 1/4n(SQ5), \quad (5)$$

$$P = n(SQ2) + 1/\sqrt{2} [n(SQ1) + n(SQ3)], \quad (6)$$

$$E = 1/4n(SQ1) - 1/4n(SQ3) + 1/2n(SQ5), \quad (7)$$

де $n(i)$ – число елементів i на зображенні.

Програмна реалізація стереолого-морфологічного аналізу здійснена у вигляді добре відомого в електронній мікроскопії комплексу програм ПП «STIMAN» та його модифікаціями за участю професора В. Соколова (Росія) [10].

II. Математичний формалізм PEM-фотограмметричної засічки як алгебраїчна задача на власні значення.

В загальному випадку математичний розв'язок задач PEM-стереометрії базується на застосуванні

умови компланарності трьох векторів $(S_1, S_2, S_1m_1, S_2m_2)$, на основі яких складається система рівнянь поправок для визначення координат (S_1, S_2) лінійних кутових елементів взаємного орієнтування. Це значить, що просторові координати точок S_1, S_2, m_1, m_2 задовольняють умові:

$$\phi = \begin{bmatrix} X_{S_1} & Y_{S_1} & Z_{S_1} \\ X_{S_2} & Y_{S_2} & Z_{S_2} \\ X_{m_1} & Y_{m_1} & Z_{m_1} \\ X_{m_2} & Y_{m_2} & Z_{m_2} \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

Для розв'язання (8) необхідна лінеаризація рівнянь, яка розв'язується за методом найменших квадратів (МНК):

$$\sum_1^n A_i \cdot t_i + l_i = V, \quad (9)$$

$$B \cdot R = \begin{bmatrix} 0 & -b_z & b_y \\ b_z & 0 & -b_x \\ -b_y & b_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix},$$

де $A_i = \frac{\partial \phi}{\partial t_i}$ – частинні похідні за відповідними

$$b = [b_x b_y b_z]^T$$

невідомими.

Такий підхід можливий при наявності просторових тест-об'єктів, виготовлення яких можливе із застосуванням сучасних нанотехнологій [9].

Інший підхід передбачає розв'язання основної в РЕМ-стереометрії прямої фотограмметричної засічки як алгебраїчної задачі на власні значення. В цьому методі також використовується умова компланарності:

$$S[S_1 m_1]^T \cdot b \cdot R_2 \cdot [S_2 m_2] = 0, \quad (10)$$

де

$$\overline{S_1 m_1} = [x_1 y_1 1]^T$$

$$\overline{S_2 m_2} = [x_2 y_2 1]^T$$

$$B \cdot R = \begin{bmatrix} 0 & -b_z & b_y \\ b_z & 0 & -b_x \\ -b_y & b_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Відповідно умова взаємного орієнтування матиме вигляд:

$$[S_1 m_1]^T \cdot T \cdot [S_2 m_2] = 0, \quad (14)$$

Позначивши рядки добутку матриць $[S_1 m_1]^T \cdot [S_2 m_2]$ як a_1^T, a_2^T, a_3^T , отримаємо

$$a^T \cdot X = 0, \quad (15)$$

де

$$T \cdot T^T = (B \cdot R) \cdot (B \cdot R)^T = \begin{bmatrix} b_y^2 + b_z^2 & -b_y b_x & -b_z b_x \\ -b_y b_x & b_z^2 + b_x^2 & -b_y b_x \\ -b_z b_x & -b_y b_z & b_y^2 + b_x^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Із визначення норми і побудови вектора \bar{X} справедливі такі співвідношення:

$$\|X\|^2 = \|T\|^2 = Sp(T \cdot T^T) = 2\|b\|^2 = 2 \quad (18)$$

З урахуванням отриманих співвідношень умова мінімізації має вигляд:

$$\min_X \|A_n X\|^2 \quad (19)$$

В такій постановці умова мінімізації відповідає алгебраїчній задачі знаходження власних значень. Отримавши розв'язок для X можна обчислити матриці R і B .

Визначення оцінки для X рівнозначне визначенню матриці $T \cdot T^T$, тому можна мінімізувати таку очевидну умову:

$$\min_B \|T \cdot T^T + B^2\|^2 \text{ when } \|b\|^2 = 1 \quad (20)$$

Оскільки $Sp(T \cdot T^T - 1)$ не залежить від вектора b і $\|b\|^2 = 1$, то очевидно мінімум досягається, коли власний вектор матриці $(T \cdot T^T - 1)$ або матриці $T \cdot T^T$ відповідає її найменше власне значення.

Представимо базис

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -b_z & b_y \\ b_z & 0 & -b_x \\ -b_y & b_x & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

і виміряні координати точок m_1 і m_2 відповідними матрицями:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} x_2 & 0 & 0 \\ y_2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Позначимо $B \cdot R = T$ або

$$a = \begin{bmatrix} x_1 x_2 & x_1 y_2 & x_1 \\ y_1 x_2 & y_1 y_2 & y_1 \\ x_2 & y_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

а X визначаються параметри матриці T .

Розв'язання рівняння (15) здійснимо за такою схемою. Нехай компоненти векторів $S_1 m_1$ and $S_2 m_2$ нормовані так, що виконується умова $\|b\|^2 = 1$, а матриця R ортонормована, тобто $R \cdot R^T = 1$. Після нескладних перетворень отримаємо:

Коли відомі матриці T і B , то можна здійснювати наступну мінімізацію:

$$\min_R \|T - BR\|, \quad (21)$$

з якої визначається матриця rotaції R у вигляді власного вектора, що відповідає найменшому власному значенню.

Рішення прямої фотограмметричної засічки в РЕМ як алгебраїчної задачі на власні значення відповідає певним алгоритмам математичної томографії. Така алгоритмізація дозволяє здійснювати більш чітку інтеграцію фотограмметричних і томографічних методів.

III. РЕМ-стереометрія зображень, отриманих в режимі наведеного струму.

В роботі [16] нами запропоновано принципово новий в нанометрії спосіб дослідження приповерхневої топології об'ємних структур твердотілих мікрооб'єктів. Спосіб базується на поєднанні принципів електронної мікротомографії і стереовимірювань [17, 18, 19], і передбачає реконструкцію внутрішньо-об'ємної будови об'єкта за даними енергетичних спектрів відбитих електронів.

Кількісна оцінка архітектури заглиблено-схованих деталей об'єкта проводилася для окремих випадків, обмежених системою плівка – підкладка [15]. Тому має значення спроба здійснити кількісну мікротомографію за наведеними вище алгоритмами.

Важливим моментом є те, що запропонований метод не є простим додаванням переваг двох відомих методів. Їх поєднання відкриває абсолютно інші можливості у наномікроструктурних дослідженнях – одержання точної кількісної інформації про внутрішню структуру твердотілого об'єкта.

Метод стереомікротомографії дозволяє візуалізувати приховані під поверхнею внутрішньооб'ємні деталі (дефекти) мікронеоднорідностей, а також здійснювати кількісну реконструкцію топології об'єкта за глибиною. Це особливо важливо, наприклад, в області мікроелектроніки при діагностуванні багаторівневих мікросхем, а також інших багат шарових об'єктів.

Розглянемо в загальному фізичну суть методу стереомікротомографії в режимі наведеного струму. Вибором прискорюючої напруги РЕМ (тобто глибини виходу відбитих електронів) і відповідного енергетичного вікна спектрометра (положення на енергетичній осі і ширини діапазону енергій детектуючих електронів) досягаються 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 ви-

сотну (глибинну) роздільну здатність, обернено пропорційне прискорюючій напрузі РЕМ.

Суть експериментальних досліджень 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 модифікації програм ПП «STIMAN» і «Sterecon» [19]. 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.

Результатом стереореконструкції 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 перерізів вздовж будь-яких заданих напрямків, за якими можна визначити всі розміри аналізованого РЕМ-зображення.

Проілюструємо працездатність запропонованого методу наступним прикладом. На рис. 3 представлені дві мікрофотографії фрагмента тривірневої мікросхеми, які отримані у вторинних електронах на РЕМ JSM-35CF при кутах нахилу 18° і 30° . Прискорююча напруга РЕМ (25кеВ) і енергетичне вікно (10-20кеВ) підбрані так, щоб одночасно було видно всі шари досліджуваної мікроструктури. Відзначимо, що чіткої сепарації заглиблених шарів у цьому випадку здійснити не вдалося, хоча контраст зображень схованих шарів вийшов більш високим, ніж у випадку стереознімання без електронного енергетичного аналізатора.

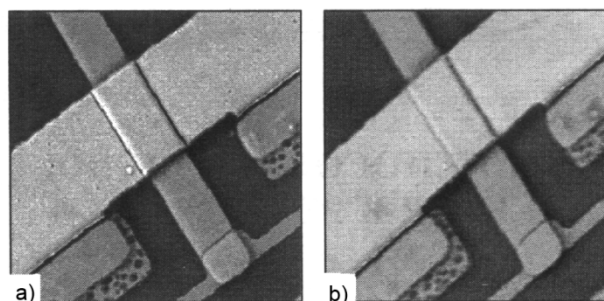


Рис. 3. Стереопара фрагмента багаторівневої мікросхеми, зняті у відбитих електронах при кутах нахилу об'єкта 18° (а) і 30° (б) ($\times 3500$).

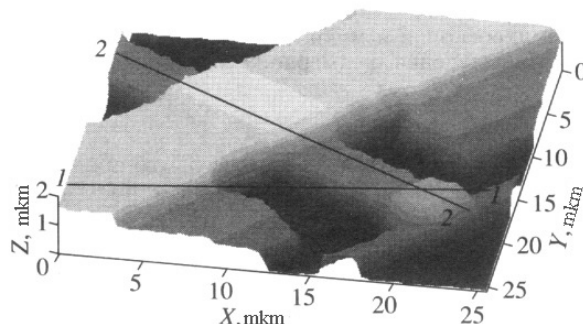


Рис. 4. Тривимірне зображення багат шарового об'єкта, реконструйованого за стереопарою (Рис. 3).

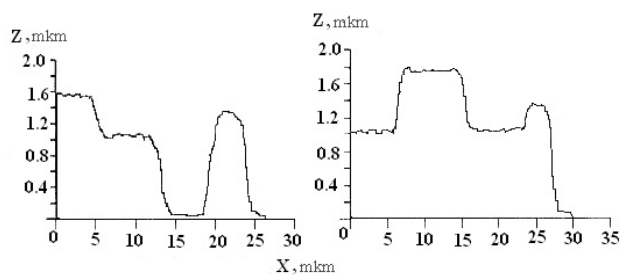


Рис. 5. Профілі розподілу структури мікросхеми по глибині уздовж зрізів ліній 1 і 2 на рис. 4.

Другим очевидним обмеженням тут виявилось те, що поверхневий шар металізації, проміжний оксидний шар і нижній шар підкладки мають дуже мале число дрібних деталей структури, за якими проводиться відлік паралакса. Усі ці артефакти ускладнюють процес коректного відновлення глибинної будови об'єкта. Проте, незважаючи на ці обмеження, вдалося досить якісно реконструювати тривимірну архітектуру об'єкта (рис.4), а також окремі профілі – розподіли структури за глибиною (рис.5). Отримані результати показують, що при подальшому вдосконаленні методу, зокрема, враховуючи зони взаємодії електронів з матеріалом об'єкта, він може стати ефективним засобом візуалізації і кількісної тривимірної реконструкції заглиблених приповерхневих деталей неоднорідного за об'ємом твердотілого об'єкта.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

1. Розроблено та описано взаємодоповнюючі алгоритми нанометричної інтерпретації растрово-електронно-мікроскопічних (РЕМ) зображень, отриманих в режимі катодолюмінісценції, вторинних електронів та наведеного струму.

2. Запропоновано метод, який базується на поєднанні принципів електронної мікротомографії і стереовимірювань, і передбачає реконструкцію внутрішньооб'ємної будови об'єкта за даними енергетичних спектрів відбитих електронів.

3. Подальше удосконалення даної методики бути ефективним засобом для візуалізації та кількісної тривимірної реконструкції заглиблених приповерхневих деталей неоднорідного за об'ємом твердотілого об'єкта.

ЛІТЕРАТУРА

1. D. M. Tsai and B. Hsiao, 2001, Automatic surface inspection using wavelet reconstruction, Pattern Recognition, vol. 34, pp.1285-1305.
2. Мельник В.М., Рудь В.Д., Мельник Ю.А., 2014, Математичний формалізм стереології порового простору порошкових матеріалів //Международный научно-технический журнал "Порошковая металлургия" (Powder Metallurgy), №1/2 (495).- С.135-141
3. Мельник В.М. Шостак А.В., 2009, Растрово-електронна стереомікрофрактурографія: Монографія – РВВ "Вежа" ВНУ ім. Лесі Українки, Луцьк, с. 469.- ISBN 978-966-1532-01-3
4. M. Antonini, M. Barlaud, I. Daubechies, P. Mathieu, 1991, Image coding using vector quantization in the wavelet transform domain, IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, pp. 2273–2276
5. Serra J., 1992, Image Analysis and Mathematical Morphology.- London: Academic Press., P.329
6. K. Nakamae, M. Chikasa and H. Fujioka, 2007, Estimation of electron probe profile from SEM image through wavelet multiresolution analysis for inline SEM inspection, Image Vision Computing, vol. 25, pp.1117-1123
7. Ососков Г., Шитов А., 1997, Применение вейвлет-анализа для обработки дискретных сигналов гауссовской формы Сообщения объединенного ин-та ядерных исследований, P11-97-347.- Дубна.
8. Ососков Г., Шитов А., 2000, Сравнительные характеристики возможностей вейвлетов первого и второго поколения // Proceedings of 2-nd Int. Conf. "МТСП-2000".- Дубна, 20р.
9. Gackenheim C., Cayman L, Reifenberger R.,2006, Analysis of scanning probe microscope images using wavelet Ultramicroscopy, №3.-р.20-30
10. Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Розгулина О.В., Мельник В.Н., 2002, Автоматизированная система морфологического анализа скелетного компонента микроструктуры по РЭМ-изображениям // Поверхность. Рентген, синхрон. и нейтрон, исслед., № 10. –С. 66-69.
11. Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Разгулина О.В., 1998, Программно-аппаратный комплекс для исследования микроморфологии поверхности твердых тел по РЭМ-изображениям // Поверхность, № 1. –С. 33-41
12. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А., 1989, Микроструктура глинистых пород. Под ред. Акад. Е.М. Сергеева, Москва, Недра, 209с.
13. R. L. Ogniewicz and M. Ilg, 1992, Voronoi skeletons: Theory and applications, in Proc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Champaign, Illinois, pp. 63–69.
14. R. L. Ogniewicz, 1993, Discrete Voronoi Skeletons. Konstanz, Germany: Hartung-Gorre Verlag. Revised and extended version of Ph.D. thesis No 9876, ETH-Zurich, Switzerland.
15. V. Rud, Y. Melnyk., 2012, Fracture surfaces stereometry of powder materials Scientific Journal of The Ternopil National Technical University, #4(68), p.58-67
16. Дицман С.А., Дубова О.Л., 1987, Формирование стереоизображения в РЭМ при использовании сигнала наведенного тока. Изв. АН СССР. Сер. физ., Т.51. -№3.- С.497-499.
17. Дицман С.А., Мельник В.Н., Рау Э.Н., Сенов Р., Соколов В.Н., Юрковец Д.И., 2000, Стереомикротомография – новый способ изучения трехмерных микроструктур в РЭМ. Поверхность. Рентген, синхрон. и нейтрон, исслед. № 12. –С. 13-15.
18. Шостак А.В., Мельник В.М., 2009, Метод РЕМ-стереомікротомографії. 36. Теорет. и експер. иссл. в технологиях современного металловедения и машиностроения. – Луцьк.
19. Sokolov V., Yurkovets D., Melnik V., Boyde A., Howell P, 2001, 3D reconstruction of surface and Subsurface structures of Solids by SEM Stereo Images. Inst. Phys. Conf. Dundee, №168. -Section 4. -P. 119-122.

REFERENCES TRANSLATED AND TRANSLITERATED

1. D. M. Tsai and B. Hsiao, 2001, Automatic surface inspection using wavelet reconstruction, Pattern Recognition, vol. 34, pp.1285 -1305.
2. Melnik V.M., Rud V.D., Melnik Yu.A, 2014, Matematichnyi formallizm stereologiyi porovogo prostoru poroshkovih materlalliv //Mezhdunarodniy nauchno-tehnicheskiy zhurnal "Poroshkovaya metallurgiya" (Powder Metallurgy), #1/2 (495).- S.135-141
3. Melnik V.M. Shostak A.V., 2009, Rastrovo-elektronna stereomikrofraktofilya: Monografiya – RVV "Vezha" VNU Im. Lesi UkraYinki, Lutsk, s. 469.- ISBN 978-966-1532-01-3
4. M. Antonini, M. Barlaud, I. Daubechies, P. Mathieu, 1991, Image coding using vector quantization in the wavelet transform domain, IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, pp. 2273–2276
5. Serra J., 1992, Image Analysis and Mathematical Morphology.- London: Academic Press., P.329
6. K. Nakamae , M. Chikasa and H. Fujioka, 2007, Estimation of electron probe profile from SEM image through wavelet multiresolution analysis for inline SEM inspection, Image Vision Computing, vol. 25, pp.1117 -1123
7. Ososkov G., Shitov A., 1997, Primenenie veyvlet-analiza dlya obrabotki diskretnyih signalov gaussovskoy formy Soobscheniya ob'edinennogo in-ta yadernyih issledovaniy, R11-97-347.- Dubna.
8. Ososkov G., Shitov A, 2000, Sravnitelnyie harakteristiki vozmozhnostey veyvletov pervogo i vtorogo pokoleniya // Proceedings of 2-nd Int. Conf. "MTCР-2000".- Dubna, 20p.
9. Gackenheimer C., Cayman L, Reifenberger R.,2006, Analysis of scanning probe microscope images using wavelet Ultramicroscopy, №3.-p.20-30
10. Sokolov V.N., Yurkovets D.I., Rozgulina O.V., Melnik V.N., 2002, Avtomatizirovannaya sistema morfologicheskogo analiza skeletnogo komponenta mikrostrukturyi po REM-izobrazheniyam // Poverhnost. Rentgen., sinhron. i neytron, issled., # 10. –S. 66-69.
11. Sokolov V.N., Yurkovets D.I., Razgulina O.V., 1998, Programmno-apparatniy kompleks dlya issledovaniya mikromorfologii poverhnosti tverdyih tel po REM-izobrazheniyam // Poverhnost, # 1. -S. 33-41
12. Osipov V.I., Sokolov V.N., Rummyantseva N.A., 1989, Mikrostruktura glinistyih porod. Pod red. Akad. E.M. Sergeeva, Moskva, Nedra, 209s.
13. R. L. Ogniewicz and M. Ilg, 1992, Voronoi skeletons: Theory and applications, in Proc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Champaign, Illinois, pp. 63–69.
14. R. L. Ogniewicz, 1993, Discrete Voronoi Skeletons. Konstanz, Germany: Hartung-Gorre Verlag,. Revised and extended version of Ph.D. thesis No 9876, ETH-Zurich, Switzerland.
15. V. Rud, Y. Melnyk., 2012, Fracture surfaces stereometry of powder materials Scientific Journal of The Ternopil National Technical University, #4(68), p.58-67
16. Ditsman S.A., Dubova O.L., 1987, Formirovanie stereozobrazheniya v REM pri ispolzovanii signala navedennogo toka. Izv. AH CSSP. Ser. fiz., T.51. -#3.- S.497-499.
17. Ditsman S.A., Melnik V.N., Rau E.N., Senov R., Sokolov V.N., Yurkovets D.I., 2000, Stereomikrotomografiya – novyyi sposob izucheniya trehmernyih mikrostruktur v REM. Poverhnost. Rentgen., sinhron. i neytron, issled. # 12. –S. 13-15.
18. Shostak A.V., Melnik V.M., 2009, Metod REM-stereomikrotomografiyi. Zb. Teoret. i eksper. issl. v tehnologiyah sovremennogo metallovedeniya i mashinostroeniya. – Lutsk.
19. Sokolov V., Yurkovets D., Melnik V., Boyde A., Howell P, 2001, 3D reconstruction of surface and Subsurface structures of Solids by SEM Stereo Images. Inst. Phys. Conf. Dundee, №168. -Section 4. -P. 119-122.

Integrative methodology of nanometric interpretation of sem-images assessment received in the regime of cathode luminescence and secondary electron emission

Melnyk V., Shostak A., Melnyk Y.

Abstract. development of complementary algorithms for nanometric interpretation of sem-images, which obtained in cathode luminescence mode, secondary electrons and induced current, without a priori definition of projection type of 3-d micro topography reconstruction of surfaces by multiperspectival rem-images is considered in this article. The method is based on a combination of the principles of electronic micro tomography and stereo measurements, and it propose for reconstruction of the object inside volume structure according to the energy spectrum of reflected electrons. The results show that further improvement of the method it can be an effective tool for visualization and quantification of three-dimensional reconstruction of the surface depth details by volume of inhomogeneous solid object.

Keywords: SEM, 3-D reconstruction, Voronoi diagram, stereometry, reconstruction, microtomography

Интегративная методология нанометрической интерпретации оценки РЭМ изображений, полученных в режиме катодолюминисценции и вторичной электронной эмиссии

В. Мельник, А. Шостак, Ю. Мельник

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы разработки взаимодополняющих алгоритмов нанометрической интерпретации растрово-электронно-микроскопических (РЭМ) изображений, полученных в режиме катодолюминисценции, вторичных электронов и наведенного тока без априорного апостулирования вида проекции 3-D реконструкции микротопографии поверхностей, полученных с помощью многокурсовых РЭМ-изображениями и методику использования вейвлет-фильтрации для улучшения качества РЭМ изображений. Результаты проведенных исследований показывают, что дальнейшее совершенствование методики может стать эффективным средством для визуализации и количественной интерпретации поверхностей твердых материалов

Ключевые слова: Растровая электронная микроскопия (РЭМ), РЭМ-изображение трехмерное моделирование, фильтрация, реконструкция, микротопография.