# С.В. БАЛОВСЯК<sup>1,2</sup>, Я.Д. ГАРАБАЖІВ<sup>1</sup>, І.М. ФОДЧУК<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича <sup>2</sup>Інститут металофізики ім. В.Г. Курдюмова НАН України

# ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛІЗУ ЗОБРАЖЕНЬ ЛІНІЙ КІКУЧІ

Розроблено алгоритми та комплекс програм (Image\_Compare, Image\_Profile, Fit\_Kikuchi) для аналізу характерних зображень дифракції електронів (ліній Кікучі). За допомогою методу допустимих перетворень, реалізованого в програмі Image\_Compare, мінімізується різниця зображень зразка й еталону за масштабом, яскравістю та іншими характеристиками. Зчитування та усереднення профілів розподілу інтенсивності зображень виконуються програмою Image\_Profile. Аналіз профілів розподілу інтенсивності та визначення відстані між екстремумами профілів реалізовано в програмі Fit\_Kikuchi. Отримані геометричні параметри зображень ліній Кікучі використовуються для діагностики структурних характеристик кристалів.

The algorithms and complex of the programs (Image\_Compare, Image\_Profile, Fit\_Kikuchi) for the analysis of the characteristic maps of electron diffraction (lines of Kikuchi) are designed. With the help of a method of allowed transformations realised in the program Image\_Compare, the difference of the maps of a sample and measurement standard behind a scale, brightness and other characteristics is minimized. Reading and average of structures of distribution of intensity of the maps are executed(designed) by the program Image\_Profile. The analysis of structures(profiles) of distribution of intensity and definition of spacing interval between etrmemum of structures are realised in the program Fit\_Kikuchi. The obtained geometrical parameters of the maps of lines Kikuchi will be used for diagnostic of the structural characteristics of chips.

Ключові слова: дифракції електронів (лінії Кікучі), алгоритми для аналізу характерних зображень.

#### Вступ

В результаті структурної діагностики кристалів за допомогою дифракції Х-променів та електронів отримуються складні за формою розподіли інтенсивності на експериментальних зображеннях. Метод Кікучі (дифракція електронів) відноситься до перспективних дифракційних методів [1]. На картинах Кікучі, які реєструються сучасними детекторами, спостерігається характерна система дифракційних ліній та їх перетинів (вузлів) у вигляді світлих і темних смуг (рис. 1). Зміна координат перетинів ліній Кікучі та їх профілю розподілу інтенсивності містять інформацію про структурні характеристики кристалів: значення параметру гратки, структурну однорідність та ін. Така інформація про кристали важлива, наприклад, для розробки цілеспрямованих технологій синтезу алмазу [2, 3].

Експериментальні зображення ліній на картинах Кікучі є часто розмитими і нечіткими, а локальні зміни структури кристалів можуть призводити до змін в зображеннях лише в діапазоні кількох пікселів. Крім того, картини Кікучі, отримані від різних областей кристалу, можуть відрізнятися за масштабом. Аналіз зображень ліній Кікучі в ручному режимі є досить трудомістким і не забезпечує максимальної точності [2-3], тому виникла потреба у створенні спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу дифракційних зображень.

Розроблений програмний комплекс містить три програми: *Image\_Compare*, *Image\_Profile*, *Fit\_Kikuchi*. Програма порівняння зображень *Image\_Compare*, яка використовує метод допустимих перетворень, нормалізує картини Кікучі однієї серії, максимально наближуючи зображення-зразок до еталону за масштабом, яскравістю, контрастом та іншими характеристиками. Програма *Image\_Profile* зчитує із зображення усереднені профілі інтенсивності вздовж вибраних напрямів. Програма *Fit\_Kikuchi* виконує аналіз профілів розподілу інтенсивності, наприклад, визначає відстань між мінімумом і максимумом профілю. Всі програми реалізовані в середовищі *Delphi* [4].

#### 1. Програма порівняння зображень Image\_Compare

В якості початкових даних використано експериментальні зображення ліній Кікучі. Тестові картини Кікучі отримані для серії зразків синтезованих кристалів алмазу (№ 1, № 2) за допомогою скануючого растрового електронного мікроскопу фірми "Zeiss" EVO-50 з використанням CCD – детектора (рис. 1) [3].

Для видалення високочастотного шуму зображення картин Кікучі оброблялися за допомогою програми, створеної в системі MatLab з використанням функцій пакету Image Processing Toolbox [5]. Використано фільтрацію зображень в частотній і просторовій області, зокрема низькочастотні фільтри Гауса (GLPF, Gaussian LowPass Filter) і Баттерворта (BLPF, Butterworth LowPass Filter).

### Технічні науки



Рис. 1. Кристал штучного алмазу № 1: а) зображення фрагмента (3,0 × 2,0 мм) поверхні, отримане за допомогою растрового електронного мікроскопу; цифрами вказані області № 1 – 9, в яких отримані картини Кікучі; б) картина Кикучі, отримана від області № 1; маркерами «+» відмічені вузли V1 – V10 перетину ліній Кікучі [3].



Рис. 2. Інтерфейс програми Image\_Compare; обробка картин Кікучі, отриманих від областей № 1 і № 2 кристалу алмаза № 2: Image\_E – зображення еталона (область № 1), Image\_P0 – початкове зображення зразка (область № 2),

Image\_P - трансформоване зображення зразка з врахуванням умов експерименту, Image\_D - зображення невідповідності між картинами Кікучі еталона і зразка. Параметри трансформації зображення зразка:

Shift X – зсув за шириною, Shift Y – зсув за висотою, Scale X – масштаб за шириною, Scale Y – масштаб за висотою, Intensity – зміна середньої інтенсивності, Rotate – кут повороту, Contrast – зміна контрасту

Проблема аналізу картин Кікучі полягає в тому, що координати перетинів ліній Кікучі (вузлів) залежать не тільки від структурних параметрів досліджуваного кристалу, але й від умов експерименту. Залежно від експериментальних умов (кут падіння електронів на зразок, відстань від зразка до детектора електронів та ін.) можливе зміщення вузла за шириною і висотою, стиснення або розтяг зображення вздовж різних напрямів, поворот, зміна середньої яскравості й інші спотворення. Тому основна задача розробленої програми полягає в компенсації різниці експериментальних умов для серії картин Кікучі, враховуючи можливі спотворення зображень і використовуючи метод допустимих перетворень [5]. В цілому задача полягає у мінімізації невідповідності (різниці) між зображенням-зразком ліній Кікучі та зображенняметалоном, отриманим від іншої області кристалу (рис. 2).

Алгоритм роботи програми *Image\_Compare* наступний (рис. 3). Після зчитування зображення еталону і зразка ітераційно змінюються параметри трансформації зображень (зсув, масштабування та ін.) таким чином, щоб середня різниця яскравості  $\Delta^{e,p}$  відповідних пікселів зображень була мінімальною

$$\Delta^{e,p} = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0}^{M} \frac{\left| I_{i,j}^{e} - I_{i,j}^{p} \right|}{\max},$$
(1)

де  $I_{i,j}^{e}$ ,  $I_{i,j}^{p}$  – яскравості пікселів зображення еталона і зразка відповідно; *N*, *M* – ширина і висота зображення еталона в пікселях, *max* = 255 – максимальне значення яскравості пікселів зображення.



Рис. 3. Спрощений алгоритм програми Image\_Compare

Середня різниця яскравості  $\Delta^{e,p}$  пов'язана з кореляцією *К* між зображеннями: максимальному значенню *K*=1 відповідає  $\Delta^{e,p} = 0$ , а мінімальному значенню *K* – максимальне значення  $\Delta^{e,p}$ . Параметри трансформації змінюються спочатку з великим кроком, а в процесі наближення зображень крок зменшується до встановленого мінімуму [6]. Умовою завершення програми є мінімальне значення для кроку зміни параметрів або дії користувача (рис. 3). Після програмної обробки розподіл інтенсивності картин Кікучі практично не залежить від умов експерименту, а визначається структурними параметрами дослідженої області кристалу.

## 2. Програма зчитування профілю розподілу інтенсивності Image\_Profile

Профілі розподілу інтенсивності, перпендикулярні певній лінії Кікучі, визначаються за допомогою розробленого алгоритму і програми *Image\_Profile* (рис. 4). Програма *Image\_Profile* дозволяє зчитувати окремі профілі, а також усереднювати серії профілів вздовж певного напряму. За рахунок такого усереднення значно ослаблюється випадкова складова інтенсивності (шум).

Технічні науки



Рис. 4. Інтерфейс програми Image\_Profile: зчитування усередненого профілю у (x), перпендикулярного напрямку лінії Кікучі між вузлами V2 і V4 (кристал алмаза № 1, область № 1)



Рис. 5. Профілі розподілу інтенсивності для ліній Кікучі (кристал алмазу № 1, рис. 4) та їх окремих фрагментів (в області піків): 1 (крива з точками) – область № 1, 3 (суцільна лінія) – № 3; ширина лінії між вузлами V2-V4 для області № 1 дорівнює L<sub>24</sub> (1)=30,59 пікселя, а для області № 3 – L<sub>24</sub> (3)= 30,43 пікселя

### 3. Програма аналізу профілю Fit\_Kikuchi

Для точного визначення такого важливого геометричного параметра ліній Кікучі, як відстань між екстремумами ліній (мінімумом і максимумом, темною і світлою смугою), створено спеціалізовану програму Fit\_Kikuchi (рис. 6). Алгоритм роботи програми наступний (рис. 7). Початковий профіль y(x) (один мінімум й один максимум) зчитується з файла і перетворюється в профіль  $y_2(x)$  (два максимуми). Перетворення y(x) в  $y_2(x)$  відбувається симетричним поворотом лівої частини профілю y(x) відносно середнього значення інтенсивності профілю. Максимуми профілю  $y_2(x)$  апроксимуються двома розподілами

Гауса  $G_1(x)$  і  $G_2(x)$  (2) з координатами центрів  $x_{CI}$ ,  $x_{C2}$  й середньоквадратичними відхиленнями  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  відповідно. В якості апроксимуючої функції вибрано розподіл Гауса (нормальний розподіл) тому, що він точно описує форму більшості піків профілю.

$$G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(x-x_c)^2}{2\sigma^2}\right).$$
(2)

Сукупність розподілів Гауса описується профілем  $y_f(x) = G_1(x) + G_2(x)$ . В процесі наближення  $y_f$ 

(x) до  $y_2$  (x) координати центрів  $x_C$  й середньоквадратичні відхилення  $\sigma$  розподілів Гауса ітераційно змінюються шляхом мінімізації значення середньоквадратичної різниці

$$C_r = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_2(x) - y_f(x))^2} , \qquad (3)$$

де *n* – кількість точок профілю.

Різниця профілів  $C_r$  розраховується тільки в діапазоні ( $x_c - \sigma$ ,  $x_c + \sigma$ ) відносно центру  $x_c$  кожного розподілу Гауса, що дозволяє більш точно визначати координати піків (рис. 6). Умовою завершення програми є мінімальне значення для кроку зміни параметрів  $x_c$  та  $\sigma$  або дії користувача (рис. 7).



Рис. 6. Інтерфейс програми Fit\_Kikuchi: визначення відстані між екстремумами профілю лінії Кікучі (кристал алмаза № 1, область № 1, лінія між вузлами V2 и V4)

## Висновки

1. Створено алгоритм і програму порівняння зображень, що дозволяє нормувати масштаб та інші геометричні характеристики серії картин Кікучі. Завдяки програмній обробці розподіл інтенсивності картин Кікучі залежить тільки від структурних параметрів кристалів, а не від геометричних умов експерименту.

2. Розроблено програмне забезпечення для усереднення профілів розподілу інтенсивності ліній Кікучі вздовж певних напрямів, що значно ослаблює випадкову складову інтенсивності (шум) і підвищує інформативність методу ліній Кікучі.

3. Виконано апроксимацію профілів розподілу інтенсивності ліній Кікучі функціями Гауса за допомогою розробленого алгоритму і програми, завдяки чому підвищено точність визначення ширини ліній, а відповідно і структурних параметрів кристалу.

Таким чином, використання розроблених алгоритмів та програмного комплексу автоматизує процес аналізу зображень ліній Кікучі, мінімізуючи суб'єктивні фактори. В результаті можливе визначення локальних змін структурних властивостей кристалів на основі геометричних параметрів картин Кікучі.



#### Література

1. Bubert H., Jenett H. Surface and Thin Film Analysis. - Wiley-VCH Verlag, 2002. - 352 p.

2. Chalker P.R., Johnston C., Werner M. Physical properties of diamond for thermistors and pressure transdusers // Semiconductor Science and Technology. – 2003. – V.18. – P.113-116.

3. Ткач С.В., Кузьменко Е.Ф., Ткач В.Н. Гонтарь А.Г, Шульженко А.А. Возможности цифровой растровой микроскопии высокого разрешения при исследовании структуры режущей двухслойной пластины // Сверхтвердые материалы. – 2003. – № 5. – С. 24-30.

4. Архангельский А.Я. Программирование в Delphi 7. – М.: БИНОМ, 2004. – 1152с.

5. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MatLab. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.

6. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 509 с.

Надійшла 19.9.2009 р.

УДК 678.08

# М.Є. СКИБА, Ю.Б. МИХАЙЛОВСЬКИЙ, Г.С. ГОЛОВКО

Хмельницький національний університет

# МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ПОЛІМЕРІВ У МОЛОТКОВОМУ ПОДРІБНЮВАЧІ

Розглянуто вплив основних факторів на процес подрібнення полімерів у молотковому обладнанні. Проведено моделювання процесу подрібнення за допомогою програмного комплексу Impact і визначено ступінь впливу окремих факторів.

Influence of major factors on process of crushing polymers in hammer a grinder the equipment is considered. Modeling process of crushing by means of program complex Impact is lead and the degree of influence of separate factors is certain.

Ключові слова: подрібнення полімерів, моделювання процесу.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими практичними завданнями

В умовах постійно зростаючої конкуренції будь-яка інженерна розробка повинна задовольняти визначені критерії та не поступатися вже існуючим, а навпаки, мати істотні переваги над ними.