

РАРАНСЬКИЙ М.Д., ФОДЧУК І.М., НОВІКОВ С.М.,
КОРОВЯНКО О.Ж., БОБРОВНИК С.В., МАРМУС П.Є.

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ МІКРОДЕФЕКТІВ НА РЕНТГЕНІВСЬКИХ СЕКЦІЙНИХ ТОПОГРАМАХ

На основі чисельного рішення рівнянь Такагі досліджено вплив різних факторів на формування зображень мікродефектів, розподілених як упорядковано, так і хаотично по об'єму кристалу на секційних і плоскохвильових топограмах.

Визначення типу і характеру розподілу мікродефектів по об'єму кристалу має важливе практичне значення. Крім класичних методів селективного травлення для виявлення мікродефектів в Si, в останні роки інтенсивно використовуються інтегральні дифрактометричні і рентгено топографічні методи. Так як мікродефекти мають відносно мале і швидкоспадне поле деформацій, то однокристалні топографічні методи виявляють мікродефекти у товстих кристалах тільки після спеціального декорування домішками. Тому на даний час досить широко використовуються методи моделювання дифракційних процесів в реальних кристалах, що містять дефекти кристалічної будови. Кількісні і якісні розподіли деформаційних полів в областях локалізації дефектів на рентгенівських топограмах визначаються шляхом співставлення чисельно промодельованих і експериментально отриманих зображень [1-3].

В даній роботі на основі чисельного розрахунку основних рівнянь динамічного розсіяння рентгенівських променів реальними кристалами (рівнянь Такагі) проведені моделювання секційних топограм кристалів кремнію, що містить певним чином розподілені мікродефекти. Розглянуті випадки: декілька - п'ять ($n=6.2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$) гіпотетичних мікродефектів, розміщених в різних площинах розсіяння через 72 мкм по товщині (рис.1а,в,д), і двісті хаотично розподілених по кристалу мікродефектів ($n=2.5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$) (рис.1б,г,е). Такий вибір кількості і розміщення мікродефектів мав на меті створити найбільш сприятливі умови для дослідження механізмів формування топографічних зображень і дифрактомет-

ричних кривих, з метою найточнішого визначення інтегральних характеристик реальних кристалів.

Товщина кристалу 300 мкм. Орієнтація вхідної поверхні (001), відбивання (220) і (440). Включення моделюються сферично-симетричним пружним полем із зміщенням у вигляді:

$$u(\mathbf{r}) = \frac{C}{r^3} \mathbf{r}$$

де C - параметр деформації, або параметр “потужності” мікродфекту, який пропорційний об’єму когерентного сферичного включення.

Для більш повного уявлення про дифракційні процеси розсіяння в кристалі розраховувались також просторові розподіли інтенсивності $I_h(x)$, $I_h(y)$ по основі палатки Бормана. Шляхом інтегрування всієї топограми по координатах x , y отримані оцінки зміни відбиваючої здатності кристалу R без та з мікродфектами.

На рис.1 досліджено вплив величини параметра деформації C на роздільну здатність мікродфектів на розрахункових секційних топограмах. Геометрія розміщення мікродфектів в кристалі і змодельовані зображення дали змогу визначити критерій для розділення зображень двох мікродфектів, розміщених в напрямку осі Oy , нормальної до площини розсіяння. Відзначимо, що збільшення “потужності” мікродфектів в тонкому кристалі з $C=4 \cdot 10^{-17}$ до $C=16 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-3}$ приводить до збільшення відбиваючої здатності тонкого кристалу майже на 25%, в той же час в кристалі проміжної товщини до її подавлення на 5%.

Як свідчать просторові розподіли інтенсивності $I_h(y)$ мінімальне розділення $\Delta u_{кр}$, яке необхідне для того, щоб два преципітати були ще розділені, визначається як функція деформаційного параметра C . Критична відстань $\Delta u_{кр}$, при якій преципітати були ще розділені, зменшується із ростом параметра C по логарифмічному закону, тобто $\Delta u_{кр} \sim \ln C$. Це добре узгоджується з результатами експериментальних робіт [3,4].

Досліджено також вплив поверхневої релаксації напруг на механізми формування дифракційних зображень мікродфектів. В цілому, вплив релаксації змінює, тобто уширює розеточні зображення як в площині розсіяння, так і перпендикулярно їй. Найбільш чітко це відображаються для тих мікродфектів, які найближчі до вихідної поверхні кристалу. Для ізольованої

нерелаксуючої частинки така зміна в зображенні не залежить від положення мікрodefекту всередині кристалу і ϵ , таким чином, особливо надійним методом визначення C . Проведені нами дослідження показують, що товщина кристалу, на якій вплив поверхневої релаксації стає непомітним, зростає із збільшенням "потужності" мікрodefекту і задовільно апроксимується логарифмічною залежністю параметра C , тобто пропорційно $\ln C$.

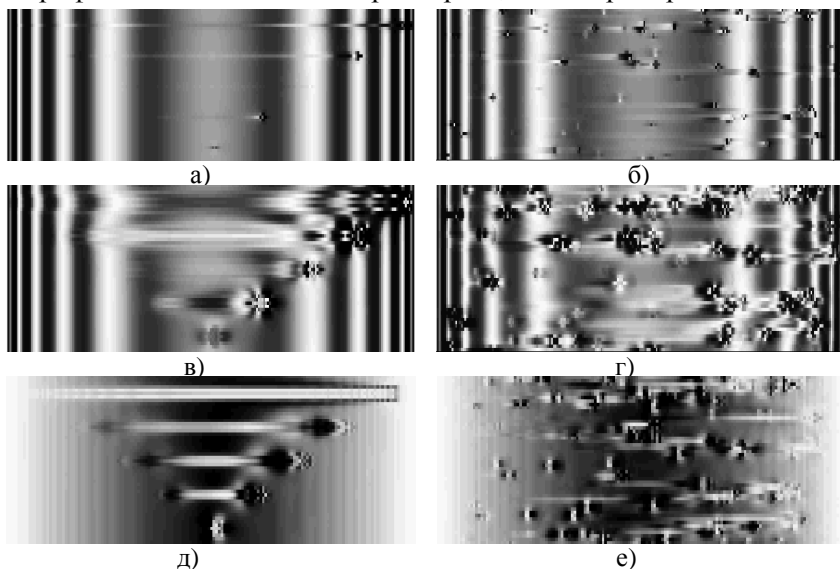


Рис.1. Секційні топограми Si з мікрodefектами: а), б), д), е) $C=4 \cdot 10^{-17} \text{см}^{-3}$; в), г) $C=16 \cdot 10^{-16}$. а)-г) (440), MoK_{α} , $\mu t \approx 0.44$. д), е) (220), CuK_{α} , $\mu t \approx 4.4$.

Таким чином, вплив поверхневої релаксації на зображення преципітатів на рентгенівських секційних топограмах істотний для тих мікрodefектів, які знаходяться поблизу вхідної або вихідної поверхонь кристалу і проявляється в збільшенні їх розмірів, а також в зміні співвідношень динамічного і проміжного зображень. Релаксація стає мало помітною на значних товщинах розміщення мікрodefектів і змінюється за логарифмічним законом від параметра деформації C .

На рис.2. представлені результати дослідження взаємодії зображень однакової "потужності" мікрodefектів, розміщених таким чином в площині розсіяння, що "новоутворені" хвильові поля на мікрodefектах співпадали за напрямком розсіяння. Як слідує з

аналізу розподілу інтенсивності в площинах розсіяння у випадку окремих мікроефектів (рис.2а,б), і випадку їх суперпозиції результуюча картина взаємодії не є простим накладанням їх зображень (рис.2г). Взаємодія динамічної, проміжної і кінематичної складових зображень має в площині розсіяння екстинкційно-фазову природу. Про це свідчить те, що в області перекриття хвильових полів утворених мікроефектами, виникають екстинкційні контури із зміненими періодами, а також деякий перерозподіл інтенсивності між ними. В кількісному вираженні це добре видно із просторових розподілах інтенсивності по осові палатки Бормана (рис.2д). Очевидно, що така не адитивна взаємодія динамічних і кінематичних складових зображень може приводити до певних неточностей при визначенні розмірів і концентрації мікроефектів із дифрактометричних

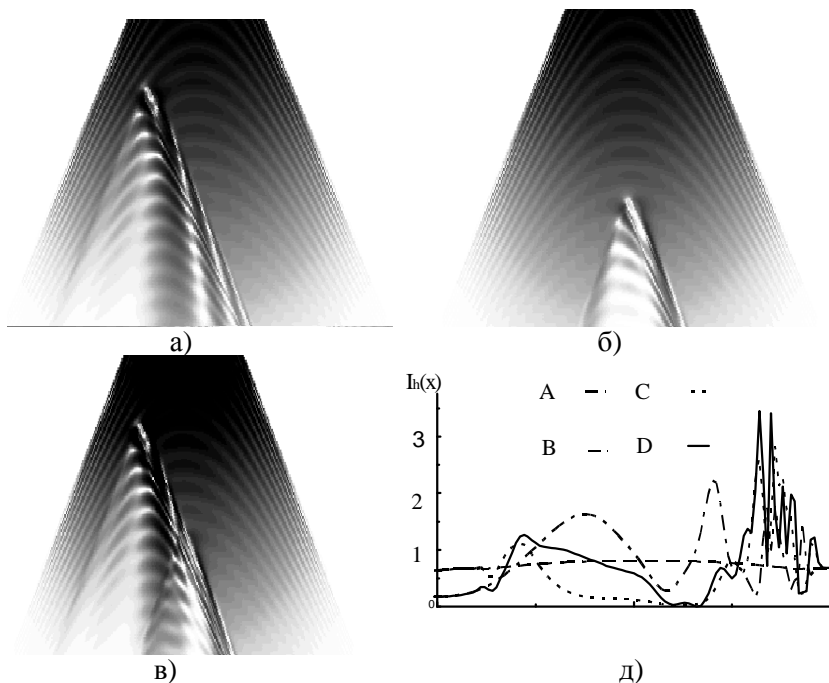


Рис.2. Формування зображень двох мікроефектів ($C=16 \cdot 10^{-16} \text{см}^{-3}$, $\text{CuK}\alpha$, $\mu t \approx 4.4$) а), б) на різних висотах в площині розсіяння; в) суперпозиція двох МД; г) просторовий розподіл: А- без МД; В, С, D -випадки а), б), в) - відповідно.

даних. Тому, напевно, потрібно враховувати таку взаємодію. Слід також зауважити, що чим більші за розмірами або “потужністю” мікрodefекти, тим більше коефіцієнт такої невідповідності.

Таким чином, проведений експеримент на основі чисельного розв'язку рівнянь Такагі дав змогу вплив деяких внутрішніх факторів на механізми формування зображень мікрodefектів на рентгенівських секційних топограмах. Це створює базу для значного підвищення ефективності і експресності як топографічних, так і дифрактометричних методів у визначенні типу, розмірів, концентрації і однорідності розподілу мікрodefектів в кристалах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Takagi S. A dynamical theory of diffraction for a distorted crystals // *Phys.Stat.Sol.*-1969.-**26**, №5.-P.1239-1253.
2. Dislocation Contrast in the Case of Anomalous X- ray Transmission / Suvorov E.V., Indenbom V.L. etc. // *Phys.Stat.Sol.(a)*.-1980.-**60**, N1.-P.27-35.
3. B.K. Tanner, *Analysis of Microelectronic Materials and Devices.*- Wiley: Eds. H. Werner and M. Grasserbauer, 1991.
4. Novel Analysis System of Imaging-Plate Plane-Wave X-ray Topography for Characterizing Lattice Distortions in Silicon / Kudo Y., Shigeru K., Liu Y.K., Kawado S. and Ishikawa T.// *Jap. J. Appl. Phys.*-1994.- **33**,N68.-P.823-825.

SUMMARY

RARANSKY M.D., FODCHUK I.M., NOVIKOV S.M.,
KOROVYANKO O.J., BOBROVNIK S.V., MARMUS P.E.
**FORMATION FEATURES OF THE MICRODEFECT IMAGES
ON X-RAY SECTION TOPOGRAPHS**

On the basis of the numerical solution of Takagi equations influence of the various factors on images formation of microdefects, both regular and chaotic distributed on volume of a crystal on section and plane wave topographs is investigated