

ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ПОЛІВ ПРУЖНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ДЕФЕКТІВ, ЩО ЗНАХОДЯТЬСЯ У РІЗНИХ ПЛАСТИНАХ *LLL*-ІНТЕРФЕРОМЕТРА

Досліджені закономірності формування інтерферометричних зображень дефектів, розташованих в різних пластинах інтерферометра, в залежності від їх взаємного розташування і співвідношення потужностей дефектів. Встановлено, що результуюча інтерференційна картина – результат сумарної когерентної фазової взаємодії "зображень" дефектів, які знаходяться в усіх пластинах інтерферометра. При значних значеннях деформацій спостерігається складна картина взаємодії зображень.

Formation laws of interferometer images of defects, located in different interferometer plates, depending on their mutual arrangement and on ratio of defect powers are investigated. It is found, that resulting interferometer picture is result of total coherent phase interaction of the "images" of defects, located in all interferometer plates. At large deformation values a complex picture of image interaction is observed.

Серед існуючих рентгендифракційних методів діагностики недосконалостей кристалів особливе місце займають методи, в основу яких покладено ефекти динамічного розсіяння рентгенівських променів. З-поміж них найбільш чутливі – інтерференційні методи маятникових і муарових смуг, які виникають при когерентній динамічній взаємодії хвильових полів у монокристалах [1-21]. Визначальна властивість рентгенівської інтерферометрії – створення груп когерентних рентгенівських пучків у вільному просторі та забезпечення їх суперпозиції [3,4]. До недавня увагу дослідників у рентгенівській інтерферометрії приваблювали в основному прецизійні вимірювання показників заломлення і дисперсійних поправок до атомних амплітуд розсіяння [4-6], вимірювання переміщень з великою точністю і уточнення числа Авогадро [7], створення нових схем багатокристалічних інтерферометрів [9].

Перевагою методу муару є надзвичайно висока чутливість до незначних деформацій кристалічної ґратки ($\Delta d/d \sim 10^{-8}$) і поворотів атомних площин ($\delta \sim 0,01''$). Унікальне фазове збільшення, що супроводжує інтерференцію майже когерентних хвильових пакетів дозволяє безпосередньо спостерігати атомні ряди кристалічної ґратки. Це відкриває нові можливості для дослідження дефектної структури кристалічних речовин [1-5, 10-22].

Із вище приведеного впливає важливість розв'язання проблеми однозначної інтерпретації інтерференції когерентних хвильових пакетів, яка існує при виборі й оптимізації конструкцій рентгенівських інтерферометрів при наявності в кристалах-компонентах *S*, *M*, *A* різного роду дефектів.

При рентгенінтерферометричних дослідженнях різноманітних фізико-хімічних і механічних впливів на процеси зміни структури монокристалів у більшості випадків в якості досліджуваного кристала використовується один із блоків *LLL*- інтерферометра [3-22].

Муарові зображення, зумовлені дією зовнішніх сил, в ідеальних інтерферометрах, визначаються тільки параметрами створеного у кристалі поля деформацій $\Delta d(\vec{r})/d$. Якщо в одному з компонентів інтерферометра існують порушення ідеальності кристалічної ґратки, то це призводить до локальної зміни вектора дифракції \vec{h} , а, отже, і до зміни розподілу інтенсивностей R_0 і R_h пучків у площині розсіяння і формування відповідної геометрії інтерференційної картини. Різниця фаз $\Delta\phi$ пучків, що приймають участь в утворенні муару, у такому випадку дорівнює [14]:

$$\Delta\phi = 2\pi(\Delta\vec{h} \cdot \vec{r}) - \pi K\chi_0(\gamma_h^{-1} - \gamma_0^{-1})z_1 - 2\pi|\Delta\vec{h}|z_1 + \phi_1, \quad (1)$$

$$\text{де } \text{tg} \varphi_1 = y \text{ tg} \left(A \sqrt{1+y^2} \right) / \sqrt{1+y^2}, \quad z_1 = t^s + t^m + t^a,$$

$$A = \frac{e^2 \lambda |F_h| t C e^{-\mu}}{m c^2 \Omega \cos \theta}, \quad y = \sqrt{\gamma_0 / \gamma_h} \frac{\sin 2\theta}{C |\chi_h|} \Delta \theta.$$

Величина $\Delta \theta$ характеризує відхилення кристала від точного положення відбивання, t^s, t^m, t^a - відповідні товщини пластинок, λ - довжина хвилі випромінювання, θ - кут дифракції Брега, C - фактор поляризації, F_h - структурна амплітуда, γ_0, γ_h - косинуси кутів входу і виходу рентгенівських променів, $\chi_{0,h}$ - коефіцієнти Фур'є поляризованості кристалу, μ - лінійний коефіцієнт поглинання. Тут $\Delta \vec{h}$ - приріст вектора дифракції в одному з плеч інтерферометра. Загалом період муарової картини Λ визначається величиною $\Delta \vec{h}$, тобто $\Lambda = |\Delta \vec{h}|^{-1}$. Варто відзначити, що через невизначеність $\Delta \vec{h}$, тільки в деяких випадках співвідношення (1) можливо розписати в явному вигляді. Відстані між муаровими смугами Λ та їх нахил φ відносно відбиваючих площин пов'язані з величиною відносної деформації $\Delta d/d$ і поворотом атомних площин δ відомими в геометричній оптиці співвідношеннями [1,2]:

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{d - d_0}{d} = 1 - \frac{\Lambda}{\sqrt{d^2 + \Lambda^2 + 2d\Lambda \cos \varphi}}, \quad (2)$$

$$\delta = \frac{d_0 \sin \varphi}{\Lambda + d_0 \cos \varphi},$$

де d_0 - період досконалої кристалічної ґратки. Саме в такій формі наведені співвідношення (2) зручні для аналізу полів зміщень і деформацій, які утворені дефектами структури.

У структурному муарі, тобто при наявності поворотів атомних площин у пластинах інтерферометра, їхнє зображення визначається також початковою різницею фаз $\Delta \varphi_0$, із якою інтерферують в аналізаторі хвилі E_{0h} і E_{hh} (рис.1):

$$\Delta \varphi_0 = \varphi^{(1)} - \varphi^{(2)}, \quad (3)$$

де $\varphi^{(1)}$ і $\varphi^{(2)}$ - фази хвиль E_{hh} і E_{0h} . При ідеальній геометрії інтерферометра, значення $\Delta \varphi_0$ в (3) визначаються структурною досконалістю областей кристалів S і M , через які проходять пучки, що інтерферують, отже, відповідно до співвідношення (1):

$$\Delta \varphi_0 = 2\pi (\Delta \vec{h}_s^{(1)} \vec{r} + \Delta \vec{h}_m^{(1)} \vec{r} - \Delta \vec{h}_s^{(2)} \vec{r} - \Delta \vec{h}_m^{(2)} \vec{r}). \quad (4)$$

Вид функції $\Delta \varphi_0(x,y)$, в основному, визначає

розташування і період смуг Λ структурного муару при таких дослідженнях. Координати x, y задають положення точок на вхідній поверхні аналізатора.

Для вивчення особливостей формування зображень окремих дефектів у вихідному структурному муарі використовувався трикристальний інтерферометр.

Дією зовнішніх контрольованих сил у першій і третій пластинах інтерферометра створювалися задані поля деформацій. Це надало можливість експериментально досліджувати механізми формування відповідних муарових зображень. Поле деформацій у першій пластині інтерферометра (рис.1) створювалося нанесенням діамантовим індентором подряпини в напрямку $[11\bar{2}]$. Дією зосередженої сили на клиноподібний аналізатор інтерферометра моделювалися протяжні поля деформацій. Рентгенівська топографія проводилася в $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні з використанням відбивання $(2\bar{2}0)$. Моделювання різних варіантів взаємного розташування та співвідношення потужностей джерел деформації проводилося вибором точки дії сили й зміною навантаження P в широких межах. Для зручності аналізу отриманих експериментальних результатів на інтерферограмах (рис.2 і 4) запропонована така система координат: осі Ox, Oy збігаються з кристалографічними напрямками $[1\bar{1}0]$ і $[11\bar{2}]$. Початок

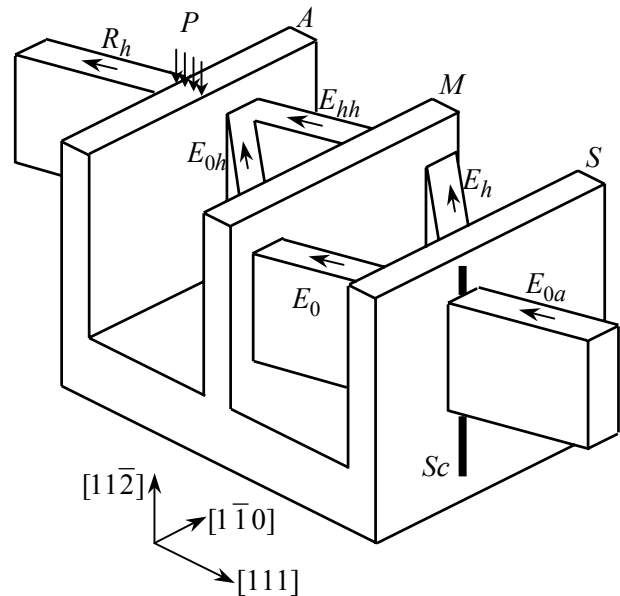


Рис.1. Схема експерименту. початок координат збігається з точкою прикладення сили P , площина xOy збігається з вхідною поверхнею кристалу-аналізатора - (111), вісь Ox антипаралельна вектору дифракції. Сила P діє вдовж напрямку $[112]$.

координат вибрано так, щоб лінія подряпини лежала на осі Oy , а точки дії зовнішнього зосередженого навантаження знаходилися на осі Ox . Верхній край подряпини розташований на відстані 5 мм від початку координат.

На рис.2 наведені характерні інтерферограми, отримані при різних значеннях P для незмінного положення точки прикладення сили $x(A)=1,1$ мм. Топограма на рис.2а характерна тим, що муарові зображення аналізованих дефектів локалізовані в окремих областях. У верхній частині топограми спостерігається муарове зображення поля деформацій, створеного зовнішньою зосередженою силою, а в нижній частині – муарове зображення поля деформацій, створеного подряпиною. Поступове збільшення зосередженої сили приводить відповідно до росту області виявлення її зображення і при певних значеннях P спостерігається накладання частин муарових зображень, створених таким чином дефектів (рис.2б). Загалом спостерігається трансформація муарової картини - помітні зміни муарових зображень обох дефектів. Спостерігається істотна несиметричність муарового зображення поля деформацій від зосередженого навантаження, хоча у кристалі-аналізаторі поле деформацій симетричне відносно напрямку дії сили.

Розглянемо більш детально зміну дифракційного зображення подряпини, тому що: по-перше, муарове зображення подряпини цілком перекривається по висоті пучка із зображенням, спричиненим дією зосередженої сили. Це дозволяє розглядати даний випадок як зображення подряпини

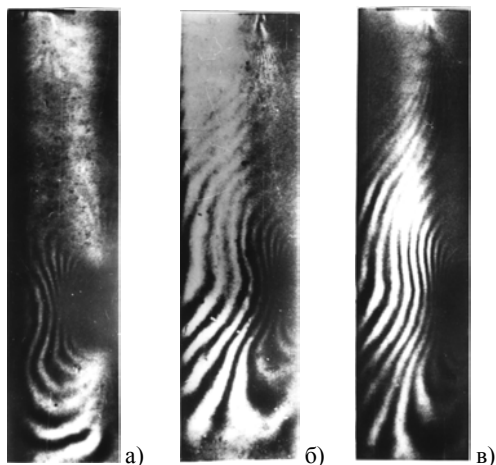


Рис.2. Муарові зображення дефектів, розташованих у різних пластинах рентгенівського LLL -інтерферометра у випадку $x=1,1$ мм при різних значеннях P : $P=0,6 p$ (а), $P=2,2 p$ (б), $P=4,8 p$ (в), де p відносний параметр деформації. Відбивання $(2\bar{2}0)$, $CuK\alpha$ -випромінювання. $\times 12$.

у структурному муарі. По-друге, на поле деформацій від подряпини діють поля деформацій зовнішньої зосередженої сили одного знаку. Останнє дозволяє кількісно оцінити зміни періодів муарових смуг у різних областях зображення подряпини. По-третє, зображення подряпини більш різноманітне, оскільки воно відображає як області стиску і розтягу, так і проміжні області між ними. Як відзначено в роботах [16,18,21] лінії нульових відносних деформацій на муарових зображеннях подряпини проходять через точки муарових смуг, в яких дотичні до них розташовані паралельно вектору дифракції. Ці лінії розділяють у кристалах області стиску і розтягу, що ідентично топографічним зображенням багатопелюсткових розеток деформацій [21]. Аналіз динаміки зображень подряпини при збільшенні прикладеної сили P показує, що найбільші зміни спостерігаються у тих областях зображення від подряпини, які характеризуються незначними значеннями деформацій і розташовані ближче до точки прикладення сили. На рис.3 наведені криві зміни періодів муарових смуг Λ (рис.3а) і відповідних їм значень відносних деформацій $\Delta d/d$ (рис.3б) уздовж прямої, що перпендикулярна до лінії подряпини і проходить через її середину (рівняння прямої в обраній системі координат $y=6$ мм). Аналіз зміни $\Lambda(x)$ і $\Delta d(x)/d$ уздовж вибраної прямої показує, що періоди муарових смуг істотно змінюються на значних віддаленнях від джерела деформацій (подряпини). Особливістю кривих, що характеризують відносні деформації уздовж аналізованої прямої при різних значеннях P , є майже однаковий характер їх зміни з віддаленням від подряпини. Це означає, що наявність структурного муару, який задається полем деформацій зосередженої сили, призводить в аналізованих випадках до незначного збільшення істинних значень $(\Delta d/d)_{\text{іст}}$ на певну величину $(\Delta d/d)_{\text{стр}}$, обумовлену наявністю структурного муару, тобто

$$(\Delta d/d)_{\text{іст}} = (\Delta d/d)_{\text{стр}} + (\Delta d/d)_{\text{деф}} \quad (5)$$

Причому величина $(\Delta d/d)_{\text{стр}}$ різна для топограм на рис.2б і 2в. З аналізу поведінки графіків $\Delta d(x)/d$ при різних P на значних віддаленнях від лінії подряпини випливає, що значення $(\Delta d/d)_{\text{стр}}$ практично збігаються зі значеннями відносних деформацій, що утворені дією зовнішньої зосередженої сили уздовж прямої $y=6$ мм.

На рис.2а легко визначаються дві лінії нульових відносних деформацій, що утворюють однакові гострі кути з віссю Oy . На рис.2б, 2в

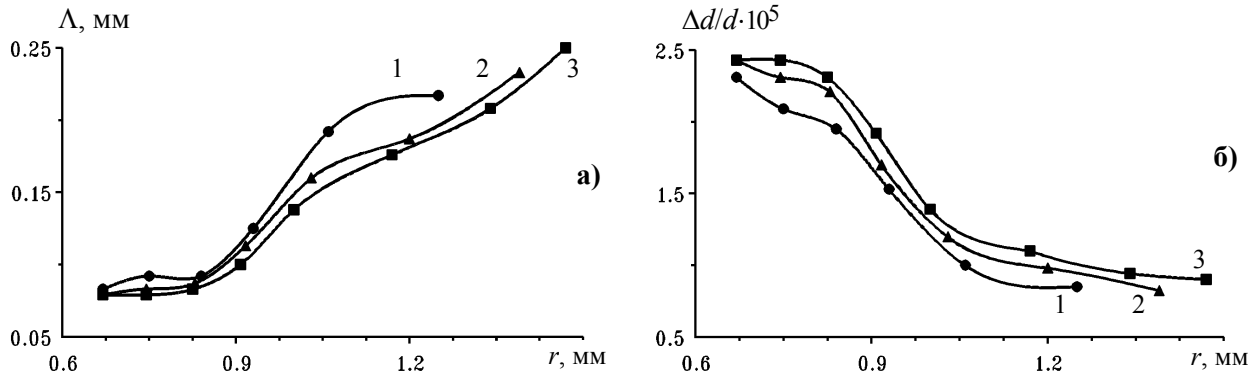


Рис.3. Зміна періодів муарових смуг Λ (а) і відповідних їм деформацій Δ/d (б) уздовж прямої, що перпендикулярна до лінії подряпини і проходить через її середину. Криві 1,2,3, відповідають даним, отриманим із топограм рис.2а-в.

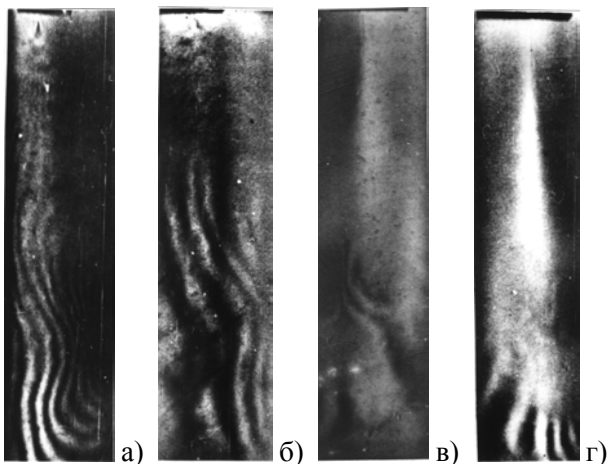


Рис.4. Муарові зображення. $P=2,5 p$, $x=1,5$ мм (а), $P=1,6 p$, $x=2,3$ мм (б), при $x=0,3$ мм $P=15 p$ (в), $P=22 p$ (г).

практично наявна тільки одна така лінія в нижній частині зображення, і з ростом P ця лінія повертається до вісі Oy . У верхній частині зображення подряпини дуже важко розрізнити лінію нульових відносних деформацій через погану видність муарових смуг в областях, що відповідають деформаціям стиску.

Суттєва зміна інтерференційної картини має також місце при зміні взаємного розташування джерел деформації. Так на рис.4а,б точки прикладення сили віддалені на великі відстані від лінії подряпини, у порівнянні з випадком на рис.2. Муарові смуги, що раніше замикалися на верхньому кінці подряпини "розвернулися" до точки дії сили. На рис.4а також спостерігається область із дуже поганою контрастністю муарових смуг

$$V = \left(\frac{R_{h\max} - R_{h\min}}{R_{h\max} + R_{h\min}} \right).$$

Погіршення видності муарових смуг очевидно обумовлено придбанням променями, що інтерферують у цій області аналізатора інтерферо-

метра, додаткової різниці фаз φ_A , протилежної за знаком до φ_0 . При істотно більших значеннях P , як впливає з рис.4в,г, деформації в аналізаторі досягають таких значень, що починає вже порушуватися когерентність взаємодіючих в аналізаторі хвильових пакетів і зображення подряпини істотно трансформується. Взаємодія зображень створених дефектів у такому випадку має складний характер. При цьому, у нижній частині топограми чітко спостерігається границя між областями кристалу де має місце когерентна і не когерентна взаємодія зображень.

Отже, загалом інтерференційну картину, отриману методом рентгенівського дифракційного муару при ідеальній геометрії інтерферометра, необхідно розглядати як результат когерентної взаємодії зображень дефектів, що знаходяться у всіх компонентах інтерферометра. Розглянуті особливості зміни зображення подряпини відносяться до випадку, коли деформації, що виникають при дії зовнішньої зосередженої сили, в області зображення подряпини, в основному, - менші від деформацій, що виникають у ближньому полі подряпини (при $x < 1,1$ мм), тобто $\Delta/d \sim 10^{-6}$. Отримані результати відкривають нові можливості формування фазових об'єктів для рентгенівської літографії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шубников А.В. Растровая модель обыкновенных групповых волн // Природа. - 1965. - №11. - С.61-65.
2. Миусков В.Ф. Рентгеновский муар на кристаллических решетках // Проблемы современной кристаллографии. - М.: Наука, 1975. - С.51-65.
3. Bonse U., Hart M. X-Ray interferometr // Appl. Phys. Letters. - 1965. - 6, №8. - P.155-156.
4. Hart M. An angstrom ruler // Brit. J.Appl.Phys. - 1968. - 1, №11. - P.1405-1408.

5. *Bonse U. Graef W.* X-ray and neutron interferometry. X-ray optics: Application for solid. - Berlin, Heidelberg, New-York: Springer Verlag, 1978.
6. *Дроздовский В.Б., Михайлюк И.П., Раранский Н.Д.* Определение показателей преломления методом рентгеновской интерферометрии // УФЖ. - 1972. - **17**, №7. - С.1212-1214.
7. *Deslattes R.D., Henin S.A., Bauman A.A.* Determination of the Avogadro constant // Phys. Rev. Letters. - 1974. - **33**, №8. - P.463-466.
8. *Deslattes R.D. Henin S.A.* X-ray to visible wave-length rations // Phys. Rev. Letters. - 1973. - **31**, №16. - P.972-973.
9. *Bonse U. Graef W.* Three beam case X-ray interferometer // Acta Cryst. - 1975. - **A31**, №3. - P.254-261.
10. *Hart M.* A complete determination of dislocation Burgers vectors by X-ray interferometry // Phil. Mag. - 1972. - **26**, №4. - P.821-831.
11. *Cristiansen G., Gerward L., Lindegaard A.* A study of the strain field of gravnin dislocations in a silicon X-ray interferometr // J.Appl. Cryst. - 1971.- **4**. - P.370-375.
12. *Gerward L.* X-Ray study of lateral strains Ion-implanted silicon // Z. Phys. - 1977. - **259**. - P.313-322.
13. *Petraschek D., Folk R.* Theory of a symmetric LLL-interferometer with arbitrary absorption // Phys. Stat. Sol. - 1976. - **A36**. - P.147-159.
14. *Simon D., Authier A.* Application de la Theorie Dynamique de S.Takagi an Rayons X. II.Franges de Moire // Acta Cryst. - 1968. - **A24**, №5. - P.527-534.
15. *Gevers R.* Dynamical theory of moire fringe patterns // Phil. Mag. - 1962. - **7**, №82. - P.1681-1720.
16. *Раранский Н.Д.* Использование рентгеновской интерферометрии для изучения дефектов структуры в монокристаллах // Пленарные доклады Всесоюзного совещания "Проблемы рентгеновской диагностики несовершенства кристаллов". - Ереван: Издательство ЕрГУ, 1985. - С.117-131.
17. *Раранский Н.Д., Шафранюк В.П.* Изображение дефектов упаковки в рентгеновском дифракционном муаре // УФЖ. - 1982. - **27**, №6. - С.901-904.
18. *Раранский Н.Д., Шафранюк В.П., Фодчук И.М.* Муаровые изображения полос роста в бездислокационном монокристалле Si // УФЖ. - 1985. - **30**, №1. - С.133-135.
19. *Raransky A.M., Struk J.M., Fodchuk I.M., Raransky N.D.* Solution of X-Ray diffraction inverse problems in optics // Proc. SPIE. - 1993. - **2013**. - P.37-44.
20. *Раранский Н.Д., Шафранюк В.П.* Дефекты границ сопряжений и релаксация напряжений в эпитаксиальных системах Si-Si, Ge-Si, Gs-Si // УФЖ. - 1985. - **30**, №1. - С.127-132.
21. *Раранский Н.Д., Шафранюк В.П., Фодчук И.М.* Рентгеноинтерферометрическое изображение полей деформаций вокруг дислокационных скоплений // Металлофизика. - 1985. - **7**, №5. - С.63-71.