

PACS numbers: 61.05.cc, 61.05.cf, 61.05.cp, 61.46.Hk, 61.72.Dd, 61.72.Lk, 81.07.Bc

## **Вплив дефектів великих розмірів на когерентну компоненту розсіяння Рентгенових променів в монокристалічних матеріалах**

С. В. Дмитрієв, В. Б. Молодкін, М. Г. Толмачов, С. Й. Оліховський,  
В. В. Лізунов

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,  
бульв. Академіка Вернадського, 36,  
03142 Київ, Україна*

Роботу присвячено дослідженню впливу дефектів монокристалів на когерентну компоненту диференційної відбивної здатності при косонесиметричній дифракції Рентгенових променів у геометрії дифракції за Бреггом. Показано можливість значного поліпшення діагностичних можливостей фазоваріаційної динамічної дифрактометрії, яке зумовлюється впливом (особливо ефективним за асиметричної дифракції) умов експерименту на прояв дефектів великих розмірів у картині розсіяння. Продемонстровано можливість розділення внесків різного типу дефектів у дифраговану інтенсивність шляхом вибору оптимальних умов експерименту.

The effect of defects on the coherent component of differential reflectivity is considered in the case of asymmetric Bragg x-ray diffraction geometry for single crystals. The possibility of a significant improvement of the diagnostic capabilities of phase-variational dynamical diffractometry is shown. This is due to the influence of experimental conditions on the manifestation of large defects in the scattering pattern and is especially effective in the case of asymmetric diffraction. The possibility of separating of the contributions of various-type defects to the diffracted intensity by choosing the optimal experimental conditions is demonstrated.

Работа посвящена исследованию влияния дефектов монокристаллов на когерентную компоненту дифференциальной отражательной способности при косонесимметричной дифракции рентгеновских лучей в геометрии дифракции по Бреггу. Показана возможность значительного улучшения диагностических возможностей фазовариационной динамической дифрактометрии, обусловливаемого влиянием (особенно эффективным при асимметричной дифракции) условий эксперимента на проявление дефектов больших размеров в картине рассеяния. Продемонстрирована возможность разделения вкладов различного типа дефектов

в дифрагированную интенсивность выбором оптимальных условий эксперимента.

**Ключові слова:** динамічна дифракція, несиметрична дифракція, когерентне розсіяння, рентгенодифракційні методи діагностики.

**Key words:** dynamical diffraction, asymmetric diffraction, coherent scattering, x-ray diffractometric diagnostics.

**Ключевые слова:** динамическая дифракция, несимметричная дифракция, когерентное рассеяние, рентгенодифракционные методы диагностики.

*(Отримано 4 грудня 2019 р.; після доопрацювання — 24 червня 2020 р.)*

## 1. ВСТУП

Сучасна мікроелектронна промисловість потребує створення монокристалічних матеріалів із наперед заданими фізичними властивостями, які визначаються як ідеальною кристалічною структурою матеріалу, так і розподіленими по його об'єму структурними дефектами. Визначення дефектної структури за допомогою дифракції Рентгенових променів має важливі з точки зору практики переваги над іншими методами, зокрема неруйнівний характер діагностики, високу чутливість та експресність. Для діагностики дефектної структури монокристалів рентгенодифракційними методами розвинуто цілий ряд підходів, що базуються як на кінематичній [1], так і на динамічній теоріях дифракції [2].

Перспективними для практичного використання є інтегральні дифрактометричні методи на основі динамічної теорії розсіяння, оскільки вони дають змогу проводити діагностику дефектної структури з найбільшою чутливістю та значно швидше, ніж методи, що базуються на вимірюванні диференційних кривих відбивання.

Кінематичний підхід базується на використанні наближення одноразового розсіяння як когерентних, так і дифузних хвиль. При цьому вплив дефектів зводиться до зменшення амплітуди когерентних хвиль за рахунок впливу Кривоглазового статичного фактора (величини, яку М. О. Кривоглаз називав статичним фактором Дебая–Валлера) [1]. Інтегральна інтенсивність кінематичного дифузного розсіяння також залежить від характеристик дефектів через вказаний фактор. Однак наближення одноразового розсіяння позбавляє кінематичний підхід можливості діагностики дефектів у кристалах за допомогою метод повної інтегральної інтенсивності, оскільки при кінематичному розсіянні величина зменшення за рахунок наявності дефектів інтенсивності когере-

нтної компоненти дорівнює інтегральній інтенсивності дифузної компоненти, і, таким чином, повна (сума Бреггової та дифузної складових) інтегральна відбивна здатність завжди дорівнює відбивній здатності ідеального кристалу.

При динамічній дифракції, як було встановлено раніше [3, 4], дефекти проявляються в картині розсіяння не лише через амплітуди хвиль, а й через їхні фази. Цей додатковий (до амплітудного) фазовий механізм впливу дефектів на інтенсивність експоненційно посилює із товщиною кристалів чутливість динамічної дифракції до спотворень кристалічної ґратниці. При цьому зменшення інтенсивності когерентного розсіяння вже не компенсується збільшенням дифузного, а тому з'являється можливість надійної кількісної діагностики дефектної структури монокристалів із використанням метод повної інтегральної інтенсивності динамічної дифракції. Окрім самого факту експоненційного підсилення внеску дефектів в інтенсивність динамічної дифракції, важливим є те, що величина такого підсилення при динамічному розсіянні залежить, крім товщини кристалу, також і від умов експерименту (довжини хвилі, вектора дифракції, азимутального кута при косонесиметричній дифракції тощо). Більше того, подібне посилення є різним для дефектів різних типів, які одночасно присутні у кристалі. Як наслідок, з'являється можливість істотно підсилювати як прояв дефектів у картині розсіяння в цілому, так і вибірково внесок кожного типу дефектів окремо. Це уможливорює шляхом варіації експоненційного фазового внеску за рахунок вибору оптимальних умов експерименту проводити надійну кількісну діагностику дефектів кількох типів, що можуть бути присутніми одночасно у монокристалічних матеріалах.

Вибірковість чутливості динамічної картини розсіяння до дефектів різних типів забезпечується, зокрема, різним характером їхнього прояву в когерентній і дифузній компонентах розсіяння [5]. Зокрема, дифузне розсіяння від дефектів малих (набагато менших довжини екстинкції) розмірів має достатньо широкий, у порівнянні з когерентним максимумом, кутовий розподіл навколо вузла оберненої ґратниці. Це означає, що достатньо мала доля розсіяного випромінення потрапляє у кутову область, яка відповідає динамічній дифракції, і при одержанні виразів для інтегральних за внеском дифузного розсіяння величин можна користуватись асимптотичними наближеннями. Коли у монокристалі присутні дефекти великих розмірів (порівнянних із довжиною екстинкції та більших за неї), все дифузне розсіяння від них концентрується поблизу вузла оберненої ґратниці, тобто саме в динамічній області. Отже, для інтегральних величин виникає необхідність врахування як в когерентному, так і в дифузному розсіянні динамічних ефектів від таких дефектів, а саме, багатора-

зовости розсіяння на періодичній і флюктуаційній частинах кристалічного потенціалу. Одними з наслідків такої багаторазовости є ефекти повного відбивання й аномального проходження дифузного розсіяння, які стають істотними і для його інтегральних внесків.

Як відомо, в геометрії дифракції за Бреґгом когерентна частина розсіяного випромінення проникає у кристал не глибше довжини Бреґгової екстинкції, тоді як дифузно розсіяне випромінення здатне проникати на глибину дифузної екстинкції, що зазвичай істотно перевищує глибину абсорбції [5, 6]. Внаслідок цього, саме глибина абсорбції визначає об'єм, у якому формується дифузне розсіяння. Оскільки глибина абсорбції набагато більша за довжину Бреґгової екстинкції, то об'єм, з якого виходить дифузно розсіяне випромінення, значно перевищує такий для когерентного розсіяння. В результаті внесок дифузного розсіяння може бути значним навіть при відносно невеликій концентрації дефектів у монокристалі. При цьому, у випадку великих дефектів, дифузно розсіяне випромінення головним чином потрапляє в область динамічної дифракції при виході з глибини кристалу та додатково підсилюється за рахунок ефекту аномального проходження, що приводить до збільшення інтенсивности дифузного розсіяння поблизу екстинкційного провалу, зумовленого ефектом повного відбивання. Ширина екстинкційного провалу, який зумовлений ефектом Бреґгової екстинкції (за рахунок повного відбивання) для дифузних хвиль, що виходять з кристалу, залежить від умов експерименту, зокрема від азимутального кута при косонесиметричній дифракції. Змінюючи азимутальний кут, можна змінювати ширину екстинкційного провалу і, тим самим, збільшувати або зменшувати частку Бреґгової екстинкції та дифузного розсіяння, підсиленого ефектом аномального проходження. При цьому дефекти Кулонового типу, але достатньо великих (співвимірних із довжиною екстинкції) розмірів, за рахунок динамічних ефектів у інтегральній інтенсивності дифузного розсіяння можуть ефективно проявлятися як дефекти другого класу. Все це дає можливість розділяти внески в інтегральну інтенсивність дифузно розсіяного випромінення від дефектів різних розмірів.

Однак при мірянні інтегральних інтенсивностей в експерименті одержується повна інтегральна інтенсивність, тобто сума когерентної та дифузної складових. Отже, для проведення діагностики характеристик дефектів декількох типів необхідно спочатку дослідити вплив умов експерименту при косонесиметричній дифракції також і на когерентну компоненту розсіяння, що уможливить керувати як внеском у неї від дефектів різних типів, так і величиною внеску когерентної компоненти в сумарну інтегральну

інтенсивність. З цією метою в даній роботі проведено аналізу впливу дефектів на когерентну компоненту диференційної відбивної здатності монокристалу.

## 2. ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ НА КОГЕРЕНТНУ КОМПОНЕНТУ ВІДБИВНОЇ ЗДАТНОСТІ В УМОВАХ КОСОНЕСИМЕТРИЧНОЇ ДИФРАКЦІЇ

Амплітудний коефіцієнт відбивання когерентної компоненти розсіяння в наближенні напівнескінченного кристалу можна записати у вигляді [7, 8]:

$$r_{\text{H}} = - \frac{\tilde{y} + \text{sgn}(w_i) \sqrt{\tilde{y}^2 - \sigma^2}}{CE\chi_{-\text{H}} + \Delta\chi_{\text{оH}}}, \quad (1)$$

$$\tilde{y} = \sqrt{b}(\alpha + \alpha_0), \quad b = \gamma_0 / |\gamma_{\text{H}}|,$$

$$\alpha_0 = (\chi_0 + \Delta\chi_{\text{HH}})/2 + (\chi_0 + \Delta\chi_{\text{оо}})/(2b),$$

$$\sigma^2 = (CE\chi_{\text{H}} + \Delta\chi_{\text{Hо}})(CE\chi_{-\text{H}} + \Delta\chi_{\text{оH}}).$$

Тут  $\chi_0$ ,  $\chi_{\text{H}}$ ,  $\chi_{-\text{H}}$  — відповідні компоненти Фур'є комплексної сприйнятливості кристалу,  $E$  — Кривоглазів статичний фактор, що описує відхил середньої сприйнятливості кристалу з дефектами від сприйнятливості (або потенціалу) ідеального кристалу,  $\Delta\chi_{\text{оо}}$ ,  $\Delta\chi_{\text{Hо}}$ ,  $\Delta\chi_{\text{оH}}$  і  $\Delta\chi_{\text{HH}}$  — дисперсійні поправки за рахунок взаємозв'язку когерентного розсіяння з дифузним до відповідних компонент Фур'є сприйнятливості кристалу,  $C$  — поляризаційний множник ( $C = 1$  для  $\sigma$ -поляризації і  $C = \cos(2\theta_{\text{B}})$  для  $\pi$ -поляризації),  $\theta_{\text{B}}$  — Бреґґів кут,  $\alpha = \Delta\theta \sin(2\theta_{\text{B}})$ ,  $\gamma_0$  і  $\gamma_{\text{H}}$  — напрямні косинуси падної та дифрагованої хвиль,  $w_i = \text{Im}(\tilde{y}^2 - \sigma^2)$ ,  $\Delta\theta$  — відхил кута падіння від Бреґґової умови. Знак  $\sqrt{x}$  означає, що при відшуканні квадратного кореня з  $x$  слід брати лише його додатне значення.

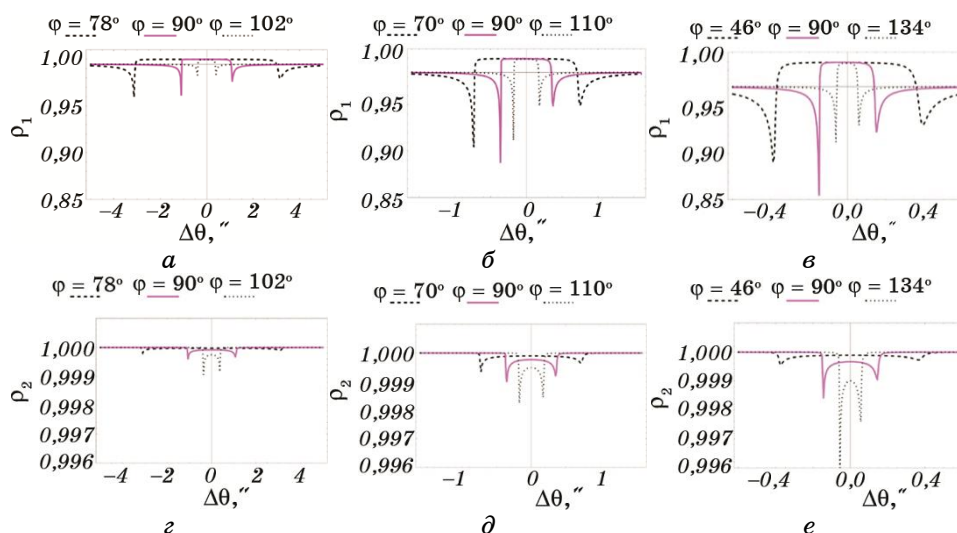
Когерентна компонента диференційної відбивної здатності, відповідно до (1), визначається виразом:

$$R_{\text{coh}}(\Delta\theta) = |r_{\text{H}}|^2 = \left| \frac{\tilde{y} + \text{sgn}(w_i) \sqrt{\tilde{y}^2 - \sigma^2}}{CE\chi_{-\text{H}} + \Delta\chi_{\text{оH}}} \right|^2. \quad (2)$$

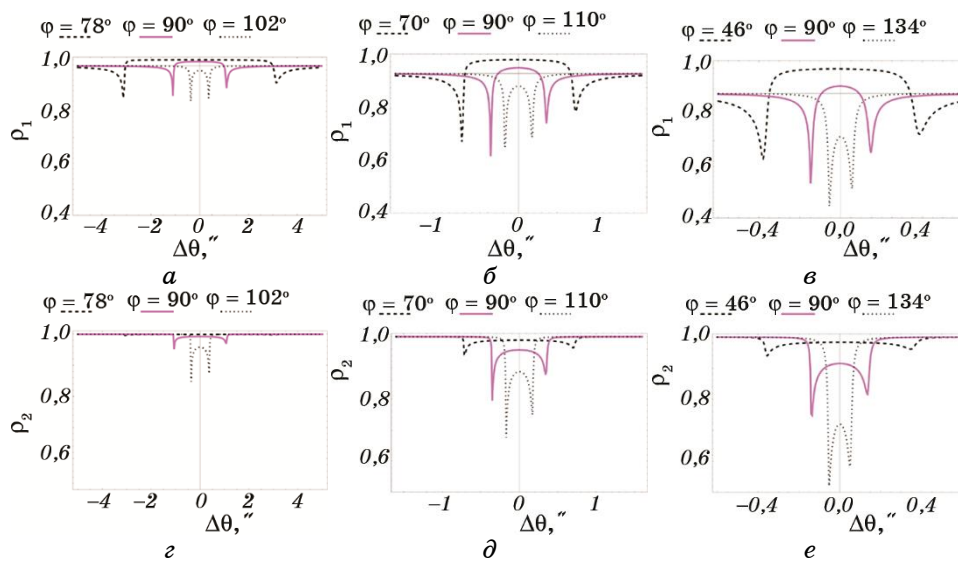
Залежність від дефектів у виразі (2) виникає за рахунок Кривоглазового статичного фактора та дисперсійних поправок. При цьому слід мати на увазі, що вирази для когерентної компоненти відбивної здатності (2) одержано в рамках теорії збурень, а тому вони справедливі лише за умови

$$\varepsilon_p = |\Delta\chi_{GG'}| / (E|\chi_{\pm H}|) \ll 1.$$

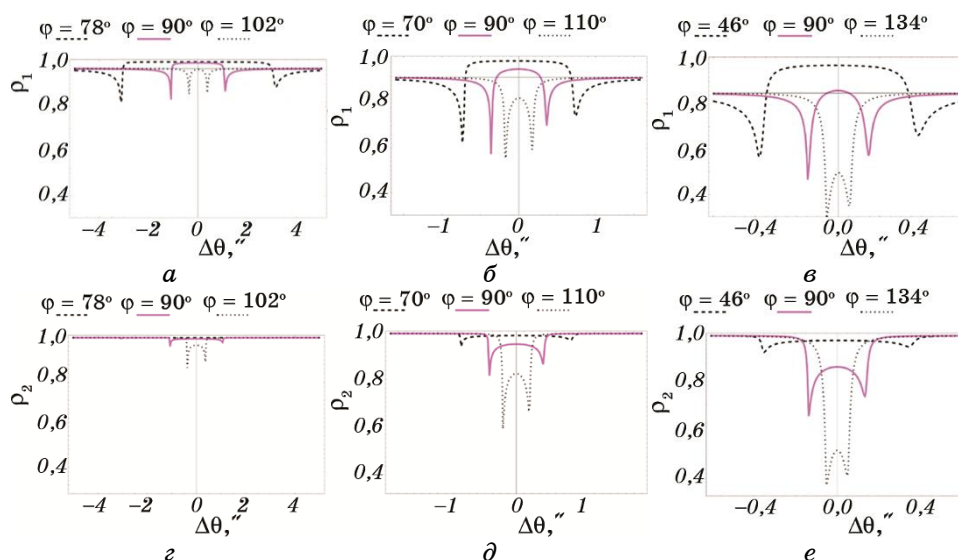
Для ілюстрації впливу дефектів на когерентну складову розсіяного випромінювання на рис. 1–3 зображено кутові залежності відношення когерентної компоненти відбивної здатності кристалу з дефектами до когерентної компоненти відбивної здатності ідеального кристалу в умовах косонесиметричної дифракції (а–е). Для порівняння величин впливів ефектів дифузної екстинкції (за рахунок дифузного розсіяння) та статичного фактора на когерентне розсіяння на рис. 1–3, з–е представлено кутову залежність відношення когерентної відбивної здатності кристалу з урахуванням Кривоглазового статичного фактора та коефіцієнта дифузної екстинкції до когерентної компоненти відбивної здатності з урахуванням лише статичного фактора. Таке відношення характеризує вплив екстинкції за рахунок дифузного розсіяння на когерентну компоненту інтенсивності. Розрахунки проведено для дислокаційних петель розмірами у 0,02 мкм, 3,5 мкм, 7 мкм, які



**Рис. 1.** Залежності відношення  $\rho_1$  когерентної компоненти диференційної відбивної здатності кристалу з дефектами до когерентної компоненти диференційної відбивної здатності ідеального кристалу від  $\Delta\theta$  (а–е) та відношення  $\rho_2$  когерентної компоненти відбивної здатності з урахуванням статичного фактора та коефіцієнта дифузної екстинкції до відбивної здатності з урахуванням лише статичного фактора (з–е). Розрахунки проведено для монокристалу Si з дислокаційними петлями радіусом  $R = 0,02$  мкм і концентрацією  $c = 3 \cdot 10^{-10}$ , випромінювання  $\text{MoK}_{\alpha 1}$ ,  $\psi = 35,27^\circ$ , відбивання (220) (а, з), відбивання (440) (б, д), відбивання (660) (в, е).<sup>1</sup>



**Рис. 2.** Теж саме, що й на рис. 1, але для дислокаційних петель радіусом  $R = 3,5$  мкм і концентрацією  $c = 2,5 \cdot 10^{-16}$ .<sup>2</sup>



**Рис. 3.** Теж саме, що й на рис. 1, але для дислокаційних петель радіусом  $R = 7$  мкм і концентрацією  $c = 4,1 \cdot 10^{-17}$ .<sup>3</sup>

будемо далі називати малими, середніми та великими петлями відповідно.

В першу чергу, слід відмітити, що найбільше дефекти змінюють когерентну компоненту в тих кутових областях, які є найбільш чутливими до динамічних ефектів у дифузному розсіянні, тобто поблизу Бреґґового максимуму. Вказані зміни полягають у зменшенні когерентної компоненти (рис. 1–3, *a–e*), що, у свою чергу, дає змогу більш чіткіше проявитися динамічному дифузному розсіянню. При цьому саме великі дислокаційні петлі найсильніше зменшують когерентну компоненту поблизу Бреґґового максимуму, адже розсіяння від дефектів великих розмірів концентрується поблизу області повного відбивання. Крім того, в умовах косонесиметричної дифракції, як видно з рис. 1–3, *e*, можна істотно підсилити вказане зменшення когерентної компоненти як за рахунок вибору більшого модуля вектора дифракції, так і за рахунок зміни азимутального кута.

Важливою з точки зору практичного використання динамічного розсіяння у кристалах з дефектами в умовах косонесиметричної дифракції є вибірковість чутливості до дефектів різних розмірів. Аналіз механізмів впливу дефектів на когерентну компоненту уможливорює використати деякі спрощення при розв'язанні оберненої задачі. Зокрема, як видно з рис. 1, *e–e*, вплив коефіцієнта екстинкції на когерентну компоненту розсіяння у випадку дислокаційних петель малих розмірів складає кілька десятих відсотка, що значно менше похибки експерименту. У випадку присутності в кристалі дефектів декількох типів загальний коефіцієнт екстинкції є сумою коефіцієнтів екстинкції від кожного типу дефектів. Отже, при розрахунку когерентної компоненти відбитої здатності у кристалі з декількома типами дефектів можна нехтувати в коефіцієнті екстинкції доданком, що відповідає малим дефектам. Вплив малих дефектів на когерентну компоненту проявляється тільки через Кривоглазів статичний фактор, в якому слід зберегти відповідний доданок. При цьому величину прояву статичного фактора можна змінювати за рахунок вибору вектора дифракції (рис. 1, *a–e*).

Однак навіть прояв малих дефектів у картині розсіяння лише через статичний фактор має певні особливості в динамічній теорії у порівнянні з кінематичною. Дійсно, в кінематичній теорії статичний фактор тільки зменшує інтенсивність когерентного розсіяння в  $E^2$  разів, тоді як при динамічному розсіянні відбувається також перерозподіл когерентної інтенсивності (рис. 1, *a–e*). Як видно з вказаних рисунків, когерентна компонента інтенсивності зменшується в  $E^2$  разів (горизонтальна суцільна лінія) лише на хвостах кривої відбивання, тоді як в області динамічного розсіяння вплив статичного фактора зумовлює перерозподіл інтенсивності. Зокрема, в області повного відбивання (поблизу  $\Delta\theta = 0$ ) статичний фактор практично не впливає на ефект повного відби-



вання, і відбивна здатність залишається близькою до одиниці навіть при збільшенні фактора за рахунок збільшення вектора дифракції (рис. 1, *в*). Причина такої поведінки когерентної компоненти інтенсивності при зміні Кривоглазового статичного фактора полягає в тому, що він впливає не лише на поглинання у відбивній здатності, а й на заломлення, тобто при динамічному розсіянні статичний фактор теж впливає на фазовий механізм прояву дефектів.

Вплив дефектів середніх і великих розмірів на когерентну компоненту розсіяння відрізняється від впливу дефектів малих розмірів (рис. 2, 3). Зокрема, вже для дефектів середніх розмірів вплив коефіцієнта екстинкції істотно збільшується (рис. 2, *г-е*) і може сягати 50%. При цьому величина впливу екстинкції за рахунок розсіяння на дефектах істотно залежить як від вектора дифракції, так і від азимутального кута. При зменшенні параметра асиметрії  $b$  відносно симетричного значення  $b = 1$  прояв екстинкції помітно зменшується (рис. 2, *г-е*, штрихова лінія), тоді як при збільшенні параметра асиметрії  $b > 1$  прояв екстинкції істотно зростає (рис. 2, *г-е*, точкова лінія). При зменшенні впливу екстинкції на когерентну компоненту розсіяння (рис. 2, *е*, штрихована лінія) характер впливу дефектів середніх розмірів на когерентну компоненту (рис. 2, *в*, штрихована лінія) стає аналогічним до характеру впливу малих дефектів (рис. 2, *а-в*), а саме, в області повного відбивання когерентна компонента змінюється слабо. Однак при збільшенні впливу екстинкції (рис. 2, *е*, точкова лінія) характер впливу дефектів на когерентну компоненту розсіяння істотно змінюється (див. для порівняння точкову та штриховану лінії на рис. 2, *в*). При значному впливі екстинкції когерентна компонентна відбивної здатності в області повного відбивання зменшується.

Аналогічна поведінка спостерігається і для дефектів великих розмірів (рис. 3). Отже, при окремих міряннях когерентної та дифузної складових у тривісній схемі зменшення висоти когерентного максимуму при  $b > 1$  (яке додатково можна підсилити шляхом вибору більшого модуля вектора дифракції) може свідчити про наявність у кристалі дефектів великих розмірів.

Таким чином, варіація азимутального кута при косонесиметричній дифракції (особливо при великому модулі вектора дифракції) уможливорює ефективно розділяти внески в картину розсіяння від дефектів малих і великих розмірів. При цьому слід зауважити, що величина когерентної компоненти може істотно зменшуватися при асиметричній дифракції. Така поведінка когерентної компоненти є характерною для дефектів другого класу при кінематичній дифракції. Значне зменшення когерентної компоненти відбивної здатності за рахунок вибору умов експе-

рименту, в яких дефекти великих розмірів поводять себе як дефекти другого класу, уможливорює збільшити відносний внесок дифузної компоненти розсіяння і, відповідно, збільшити інформативність діагностики дефектної структури монокристалічних матеріалів з використанням інтегральних рентгенодифракційних метод.

### 3. ВИСНОВКИ

В роботі досліджено когерентну компоненту відбивної здатності в умовах косонесиметричної дифракції Рентгенових променів у монокристалічних матеріалах зі статистично розподіленими мікроредфектами. Показано істотний вплив асиметрії дифракції на вибірковість чутливості картини дифракції до різного типу дефектів. Проаналізовано амплітудний і дисперсійний механізми прояву дефектів у когерентній компоненті розсіяння. Встановлено експериментальні умови, які уможливають найефективніше керувати внесками амплітудного й екстинкційного механізмів, та показано значне поліпшення діагностичних можливостей за рахунок впливу на когерентну компоненту відбивної здатності асиметрії дифракції. Описано умови, які приводять до того, що дефекти першого класу ефективно проявляються у динамічній картині розсіяння як дефекти другого класу. Це уможливорює додатково підвищити інформативність діагностики за рахунок збільшення частки дифузного розсіяння в повній інтегральній інтенсивності динамічної дифракції.

Роботу виконано за фінансової підтримки НАН України (договір № 28/19-Н).

### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. М. А. Krivoglaz, *X-Ray and Neutron Diffraction in Nonideal Crystals* (Berlin: Springer: 1996).
2. Л. И. Даценко, В. Б. Молодкин, М. Е. Осинковский, *Динамическое рассеяние рентгеновских лучей реальными кристаллами* (Киев: Наукова думка: 1988).
3. В. В. Лизунов, В. Б. Молодкин, С. В. Лизунова, Н. Г. Толмачев, Е. С. Скакунова, С. В. Дмитриев, Б. В. Шелудченко, С. М. Бровчук, Л. Н. Скапа, Р. В. Лехняк, Е. В. Фузик, *Металлофиз. новейшие технол.*, **36**, № 7: 857 (2014); <https://doi.org/10.15407/mfint.36.07.0857>.
4. Л. Н. Скапа, В. В. Лизунов, В. Б. Молодкин, Е. Г. Лень, Б. В. Шелудченко, С. В. Лизунова, Е. С. Скакунова, Н. Г. Толмачев, С. В. Дмитриев, Р. В. Лехняк, Г. О. Велиховский, В. В. Молодкин, И. Н. Заболотный, Е. В. Фузик, О. П. Васькевич, *Металлофиз. новейшие технол.*, **37**, № 11: 1567 (2015); <https://doi.org/10.15407/mfint.37.11.1567>.

5. В. Б. Молодкин, А. И. Низкова, А. П. Шпак, В. Ф. Мачулин, В. П. Кладько, И. В. Прокопенко, Р. Н. Кютт, Е. Н. Кисловский, С. И. Олиховский, Е. В. Первак, И. М. Фодчук, А. А. Дышеков, Ю. П. Хапачев, *Дифрактометрия наноразмерных дефектов и гетерослоев кристаллов* (Киев: Академперіодика: 2005).
6. З. Г. Пинскер, *Рентгеновская кристаллооптика* (Москва: Наука: 1982).
7. V. B. Molodkin, S. I. Olikhovskii, E. N. Kislovskii, E. G. Len', and E. V. Pervak, *phys. status solidi (b)*, **227**: 429 (2001); [https://doi.org/10.1002/1521-3951\(200110\)227:2<429::AID-PSSB429>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/1521-3951(200110)227:2<429::AID-PSSB429>3.0.CO;2-C).
8. S. I. Olikhovskii, V. B. Molodkin, E. N. Kislovskii, E. G. Len', and E. V. Pervak, *phys. status solidi (b)*, **231**: 199 (2002); [https://doi.org/10.1002/1521-3951\(200205\)231:1<199::AID-PSSB199>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/1521-3951(200205)231:1<199::AID-PSSB199>3.0.CO;2-Y).

## REFERENCES

1. M. A. Krivoglaz, *X-Ray and Neutron Diffraction in Nonideal Crystals* (Berlin: Springer: 1996).
2. L. I. Datsenko, V. B. Molodkin, and M. E. Osinovskiy, *Dinamicheskoye Rasseyanie Rentgenovskikh Luchey Real'nyimi Kristallami* [Dynamical X-Ray Scattering by Nonideal Crystals] (Kyiv: Naukova Dumka: 1988) (in Russian).
3. V. V. Lizunov, V. B. Molodkin, S. V. Lizunova, N. G. Tolmachev, E. S. Skakunova, S. V. Dmitriev, B. V. Sheludchenko, S. M. Brovchuk, L. N. Skapa, R. V. Lekhnyak, and E. V. Fuzik, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **36**, No. 7: 857 (2014) (in Russian); <https://doi.org/10.15407/mfint.36.07.0857>.
4. L. N. Skapa, V. V. Lizunov, V. B. Molodkin, E. G. Len', B. V. Sheludchenko, S. V. Lizunova, E. S. Skakunova, N. G. Tolmachev, S. V. Dmitriev, R. V. Lekhnyak, G. O. Velikhovskiy, V. V. Molodkin, I. N. Zabolotnyy, E. V. Fuzik, and O. P. Vas'kevich, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 11: 1567 (2015) (in Russian); <https://doi.org/10.15407/mfint.37.11.1567>.
5. V. B. Molodkin, A. I. Nizkova, A. P. Shpak, V. F. Machulin, V. P. Klad'ko, I. V. Prokopenko, R. N. Kyutt, E. N. Kislovskiy, S. I. Olikhovskiy, E. V. Pervak, I. M. Fodchuk, A. A. Dyshekov, and Yu. P. Khapachev, *Difraktometriya Nanorazmernykh Defektov i Geterosloyov Kristallov* [Diffraction of Nanosize Defects and Crystal Heterolayers] (Kyiv: Akademperіodyka: 2005) (in Russian).
6. Z. G. Pinsker, *Rentgenovskaya Kristallooptika* [X-Ray Crystal Optics] (Moscow: Nauka: 1982) (in Russian).
7. V. B. Molodkin, S. I. Olikhovskii, E. N. Kislovskii, E. G. Len', and E. V. Pervak, *phys. status solidi (b)*, **227**: 429 (2001); [https://doi.org/10.1002/1521-3951\(200110\)227:2<429::AID-PSSB429>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/1521-3951(200110)227:2<429::AID-PSSB429>3.0.CO;2-C).
8. S. I. Olikhovskii, V. B. Molodkin, E. N. Kislovskii, E. G. Len', and E. V. Pervak, *phys. status solidi (b)*, **231**: 199 (2002); [https://doi.org/10.1002/1521-3951\(200205\)231:1<199::AID-PSSB199>3.0.CO;2-Yb](https://doi.org/10.1002/1521-3951(200205)231:1<199::AID-PSSB199>3.0.CO;2-Yb).

---

UA-03142 Kyiv, Ukraine

<sup>1</sup>  $\Delta\theta$ -dependences of both the ratio of the coherent component of the differential reflectivity of the crystal with defects to the coherent component of the differential reflectivity of the perfect crystal ( $a-e$ ),  $\rho_1$ , and the ratio of the coherent component of the reflectivity with taking into account static factor and diffuse extinction coefficient to the reflectivity with taking into account only static factor ( $z-e$ ),  $\rho_2$ . Calculations are performed for a single crystal Si with dislocation loops of radius  $R = 0.02 \mu\text{m}$  and concentration  $c = 3 \cdot 10^{-10}$ , radiation  $\text{MoK}_{\alpha 1}$ ,  $\psi = 35.27^\circ$ , reflection (220) ( $a, z$ ), reflection (440) ( $b, \partial$ ), and reflection (660) ( $e, e$ ).

<sup>2</sup> See the caption of Fig. 1, but for dislocation loops of radius  $R = 3.5 \mu\text{m}$  and concentration  $c = 2.5 \cdot 10^{-10}$ .

<sup>3</sup> See the caption of Fig. 1, but for dislocation loops of radius  $R = 7 \mu\text{m}$  and concentration  $c = 4.1 \cdot 10^{-17}$ .