

## ВІДГУК

офіційного опонента про дисертацію Янчук Іванни Володимирівни «**Фазоконтрастні X-променеві томографія та інтерферометрія структурних порушень у кристалах**», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

### **Актуальність.**

X-хвильові інтерферометричні методи дослідження мають великий арсенал можливостей дослідження кристалічних структур. Дані методи дозволяють встановити основні структурні характеристики кристалічних, аморфних і біологічних об'єктів при різних патологіях та впливах. Розвитку даних методик сприяло конструювання, виготовлення і апробація різних оптичних систем: інтерферометрів, резонаторів, монохроматорів. Це дало можливість отримання значень показників заломлення речовин при різних довжинах хвиль характеристичного випромінювання, визначення густини біологічних речовин, здійснення дифракційного збільшення з метою покращення розрізної здатності інтерференційних зображень, проведення оцінки однорідності розподілу густини для непрозорих об'єктів.

У загальному випадку розсіяння X-променів на дефектах у кристалах і формування дифракційного контрасту описуються системою диференціальних рівнянь гіперболічного типу, що отримали назву рівнянь Такагі. За видом функції, що описує локальні розорієнтації відбивних площин  $\alpha(k)$  поблизу дефектів, можна розрахувати хвильові поля всередині кристалу і побудувати їх дифракційні зображення. Проте такі задачі не завжди можна розв'язати аналітичними методами. Тому, як правило, використовуються чисельні методи розв'язання рівнянь Такагі.

Слабкі і сильні деформаційні поля можна створювати в кристалі напрямленою дією зовнішніх зосереджених сил. Вибір величини, напрямку й точок прикладення сил дає можливість моделювати в кристалі дефекти типу дислокаційних скупчень, тріщин, подряпин і т.д. Це дозволяє створювати такі області пружних деформацій, в межах яких значення локальних розорієнтацій атомних площин змінюються від нуля до значень, які значно перевищують півширину кривої гойдання і, таким чином, повніше аналізувати динаміку й механізми трансформації зображень на муарових та секційних топограмах.

Незважаючи на значні успіхи в розробці основних положень динамічної теорії розсіяння X-променів у досконалих і реальних кристалічних об'єктах, існують ще значні труднощі в інтерпретації муарових картин. Зумовлено це тим, що ще не в'яяснено роль всіх факторів, які впливають на розподіл інтенсивності на такого роду картинах. Як правило, не завжди відомі результуючі дії одночасно діючих декількох факторів, хоча дія кожного з них добре відома.

Розвиток теоретичних основ і розробка алгоритмів моделювання інтерферометричних картин дозволить отримати відомості про основні механізми формування інтерференційного зображення, створюють можливість ефективного аналізу інтерференційних картин і подальшої розробки методів розв'язку обернених задач – встановлення з експериментальних муарових зображень величини і просторового розподілу деформаційного поля, що актуально і має важливе наукове та практичне значення.

Дисертація Янчук І.В. є логічним продовженням циклу наукових досліджень, які виконувались в рамках важливих пріоритетних держбюджетних науково-дослідницьких робіт, пов'язаних з науковою тематикою кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної фізики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, зокрема "Фазоконтрастні X-променеві томографія та інтерферометрія структурних порушень у кристалах та неоднорідностей біологічних



об'єктів" (№ державної реєстрації 0112U002342, 2012-2014 рр.), "Х-променево-оптична томографія полікристалічних мереж біологічних шарів" (№ державної реєстрації 0117U001149, 2017-2019 рр.).

Все вищезазначене дозволяє визнати тему дисертації актуальною і своєчасною.

### **Основні наукові результати та їх новизна.**

Результати досліджень є новими і важливими. Проведені теоретичні дослідження на базі числового розв'язку рівнянь Такагі, та перетворень Фур'є для різних випадків дії зосередженої сили дозволяють пояснити різні фізичні процеси, які відбуваються при взаємодії Х-хвиль зі структурою кристалу, деформованою певним чином. Це створює умови для розробки високоінформативних методів діагностики структурних змін на поверхні і в об'ємі кристалу на основі експериментальних даних про напрямок, величини і знаки деформацій атомних площин.

Отримані результати можуть бути використані для побудови загальної теорії розсіяння Х-хвиль реальними кристалами.

Наукова новизна проведених у дисертаційній роботі досліджень і отриманих результатів обумовлена вибором об'єкта дослідження та використанням як динамічної теорії розсіяння Х-променів, так і Фур'є аналізу з використанням числових розрахунків. Серед отриманих результатів слід відзначити наступні:

1. Встановлено, що Х-променеві муарові зображення суттєво залежать від величини та характеру розподілу зосереджених навантажень. Між значеннями сумарного навантаження  $P_{NL}$  і середньої частоти  $\bar{\nu}_R$  виявлена кореляція, яка дає змогу встановити функціональний зв'язок між ними. Запропоновано метод, який дозволяє пов'язати залежність середніх просторових частот  $\bar{\nu}_R$  енергетичних спектрів муарових зображень та суми зосереджених навантажень  $P_{NL}$ , які стали причиною виникнення деформацій.

2. Запропоновано нові підходи до аналізу муарових розподілів інтенсивності на основі методу енергетичного спектру Фур'є. Встановлена різна чутливість до характеру розподілу локальних джерел деформацій у низько- та високочастотних діапазонах радіальних розподілів енергетичних спектрів муарових зображень. Це створює нові можливості визначення не тільки сумарної величини деформації, але й їх просторового розподілу в кристалі.

3. Встановлено, що формування муарових смуг на деформаційному полі, утвореному окремими двома рядами із зосереджених навантажень, орієнтованих паралельно, перпендикулярно чи під кутом, має спільні та відмінні риси. Відмінні риси полягають у формуванні різних за періодом та формою систем муарових смуг (МС) поблизу зосереджених навантажень у рядах. Спільним є те, що при віддаленні від рядів формуються еліпсоподібні МС на результуючому деформаційному полі.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Практичне значення полягає в тому, що досягнутий рівень розуміння фізичних процесів формування муарових осциляцій інтенсивності в слабко- і сильно-деформованих областях кристалу значно підвищує інформативність і ефективність трактування зображень муарових розподілів інтенсивності. Встановлення принципів і механізмів формування муарових розподілів інтенсивності має важливе наукове і практичне значення, оскільки дає можливість уникнути неоднозначних інтерпретацій результатів з отриманих інтерференційних картин.

Практичне втілення результатів дисертаційної роботи вже підтверджено



отриманням патенту на корисну модель «Спосіб визначення величини деформаційних полів кристала на основі X-променевого муарового зображення в кремнієвому LLL-інтерферометрі».

Розроблені оригінальні алгоритми та програмне забезпечення з використанням двомірного прямого дискретного швидкого перетворення Фур'є для дослідження енергетичного спектру Фур'є муарового зображення можуть бути використані як для подальших наукових досліджень, так і у навчальному процесі підготовки магістрів.

### **Обґрунтованість і достовірність результатів.**

Викладені в дисертаційній роботі завдання, наукова новизна та висновки обґрунтовані з точки зору динамічної теорії розсіяння X-хвиль. Проведення адекватних числових розв'язків рівнянь Такагі беззаперечно підтверджується багатолітнім досвідом наукової школи кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної фізики (ФТТ) і визнанням подібного роду досліджень у вітчизняній і світовій літературі.

### **Публікації.**

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 20 праць. З них: 6 статей опубліковані у фахових наукових журналах (5 статей індексуються у Scopus та Web of Science), отримано 1 патент на корисну модель. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались на 13 міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях. Зміст дисертаційної роботи та зроблені в ній висновки достатньо повно викладені в опублікованих роботах та цілком відповідають їх змісту.

### **Структура та об'єм дисертації.**

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків та бібліографічного списку використаних джерел. Обсяг дисертації складає 160 сторінок і містить 68 рисунків та 9 таблиць. Список використаних джерел нараховує 120 найменувань.

### **Зауваження до роботи.**

До зауважень, недоліків та побажань слід віднести наступне:

1. В роботі розглянуто лише один варіант рівномірного розміщення зон навантаження (ЗН) в рядах, водночас, було б доцільним розглянути більш реальні на практиці – не рівномірні за величиною та за розміщенням.

2. Для співставлення з експериментальними муаровими картинами, отриманих при подряпинах поверхні аналізатора, було б доцільним розглянути при розрахунках теоретичних муарових картин моделі рядів із дислокаційних петель та їх скупчень

3. Було б також доцільним провести загальний та порівняльний фрактальний аналіз (хоча б фрактальну спектральну розмірність) для всіх випадків розміщення ЗН у рядах в 4-му розділі, а також і для експериментальних муарових картин.

4. На жаль, наведена на рис.4.4.6 фрактальна розмірність спектрів Фур'є перетворення лінійних перерізів інтенсивності муарових розподілів не знайшла відповідного пояснення. Водночас, наведені залежності для різних періодів фазового муару та без муару, можуть нести важливу інформацію не лише про процеси формування муарових картин, але й про невідповідність між фазовим та деформаційним муарами.

5. На мій погляд дещо менше уваги в дисертації присвячено експериментальним результатам по фазоконтрастній томографії на відміну від інтерферометрії.

6. В дисертаційній роботі використовується велика кількість позначень з

індексами, деякі з яких не чітко визначені в пункті 2.2. Це обтяжує сприйняття матеріалу. В роботі зустрічаються деякі жаргонні вирази (зокрема, чуттєвість замість чутливість) та граматичні помилки.

Однак, висловлені зауваження не змінюють загальну високу оцінку дисертаційного дослідження як цілісного, логічно довершеного наукового доробку, результати якого характеризуються високим ступенем обґрунтованості та достовірності.

Основні положення дисертації розкрито логічно, обґрунтовано та повно. Робота добре ілюстрована, оформлена актуально та відповідно до вимог ДАК МОН України. Автореферат дає повну уяву про зміст дисертаційної роботи.

#### **Висновок.**

Враховуючи високий науковий рівень дисертаційної роботи, актуальність теми, її наукову цінність, вважаю що робота Янчук Іванни Володимирівни "Фазо-контрастні X-променеві томографія та інтерферометрія структурних порушень у кристалах" відповідає вимогам ДАК МОН України, а саме п.10, п.12 та п.13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 року, які висуваються до кандидатських дисертацій а її автор Янчук Іванна Володимирівна заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла.

Член-кореспондент НАН України,  
доктор фізико-математичних наук, професор  
завідувач відділу дифракційних досліджень  
структури напівпровідників Інституту фізики  
напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України

Кладько В.П.

Підпис Кладько В.П. засвідчую:  
В. О. Вчений секретар ІФН ім. В.Є. Лашкарьова,  
канд. фіз.-мат. наук



Редько Р.А.