

ВІДГУК

офіційного опонента про дисертацію Янчук Іванни Володимирівни

«ФАЗОКОНТРАСТНІ Х-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 теми

Потреби сучасної мікро- та наноелектроніки в нових функціональних матеріалах, механічні, оптичні, електричні та магнітні властивості яких стабільні в широких межах тисків, температур та радіаційних впливів, зумовлюють пошук і вдосконалення технологічних рішень, спрямованих на отримання монокристалічних матеріалів з наперед заданими часостабільними властивостями. Водночас на передній план виходить розвиток теоретичних і експериментальних методів досліджень ступеня структурної досконалості монокристалів. При цьому широко застосовуються рентгенівські методи дослідження реальної структури кристалів і гетеросистем, зокрема рентгенівська дифрактометрія, інтерферометрія та топографія. Використання традиційних рентгенівських методів характеристики сучасних функціональних матеріалів структур ускладнюється, а в ряді випадків навіть стає неможливим через присутність ультратонких шарів, товщиною до десятих нанометра. У цьому випадку інтенсивність рентгенівського випромінювання, відбитого від таких шарів, мізерно мала і не може бути зареєстрована сучасними пристроями. Тому вдосконалення методів діагностики реальних кристалів є однією з актуальних задач сучасної фізики твердого тіла. Перспективними є інтерференційні методи. Просторова структура хвильового поля в кристалі має характерні розміри, співмірні з міжатомною відстанню, тому наявність структурних порушень призводить до помітного фазового зсуву інтерферуючих хвиль і значної зміни інтенсивності дифрагованого випромінювання навіть у тому випадку, якщо товщина досліджуваного шару не перевищує кількох періодів кристалічної ґратки. Крім того, при нанометровій товщині окремих шарів гетероструктури, реальна структура кристалів представляє собою радше систему атомних поверхонь, а не атомних площин. На сьогодні єдиним методом, що дозволяє вивчати морфологію таких поверхонь, є рентгенівська інтерферометрія. Істотною перевагою цього методу, порівняно іншими, наприклад електронною мікроскопією, є значно більше (одиниці і десятки квадратних міліметрів) поле зображення при близькій роздільній здатності. На такій площі, зокрема, можна реєструвати прогин атомних площин епітаксійної плівки з чутливістю близько одного ангстрема. При цьому зростає важливість розвитку динамічної теорії розсіювання рентгенівських променів, систематичне вивчення впливу дефектів на їх дифракцію у реальному кристалі та вдосконалення методологічних аспектів реєстрації рентгенівських інтерференційних картин. В цьому аспекті, тематика дисертаційної роботи Янчук Іванни Володимирівни, метою якої стало встановлення загальних закономірностей формування муарових зображень, що виникають у деформаційному полі, сформованому при дії одновірних рядів локальних навантажень на поверхню аналізатора класичного трикристального рентгенівського інтерферометра з геометрією дифракції за Лауе знаходиться в тренді найсучасніших тенденцій в даній області і, поза сумнівом, є актуальною як з загально-наукової, так і з практичної точок зору.

Назва роботи ««Фазоконтрастні Х-променеві томографія та інтерферометрія структурних порушень у кристалах»» у повній мірі відображає її зміст, спрямування та основні завдання, серед яких можна виділити встановлення загальних закономірностей формування муарових картин в результаті наявності деформаційних полів та дослідження впливу довгоперіодних або локалізованих деформацій на дифракцію та інтерференцію рентгенівських хвиль в реальних кристалах. Актуальність тематики роботи повністю відповідає критеріям, що висуваються МОН України до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата наук, а саме – містить нові науково обґрунтовані результати проведених здобувачем досліджень, які розв'язують конкретне наукове завдання, що має істотне значення для певної галузі знань.

Ключовим аспектом, і водночас результатом роботи, стало встановлення загальних механізмів та закономірностей формування муарових зображень деформаційних полів, що виникають при дії різних за величиною та розподілом навантажень на поверхні аналізатора трикристального рентгенівського інтерферометра. Важливо, що в даному випадку акцент зроблено саме на методологічних аспектах алгоритмізації відтворення деформаційної картини за допомогою аналізу параметрів енергетичного спектру муарових зображень. Предмет досліджень повністю відповідає формулі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла, яка, зокрема, передбачає експериментальне та теоретичне вивчення структури, фізичних властивостей кристалічних середовищ з вивченням впливу зовнішніх полів на мікро- і макропроцеси при різних умовах. Очевидно, що об'єкт досліджень роботи Янчук Іванни Володимирівни – процеси формування муарових зображень деформаційних полів методом рентгенівської інтерферометрії за умови врахування за умови вхарування анізотропних та просторових ефектів, – повністю відповідає цим критеріям. Враховуючи зазначене, дисертаційну роботу Янчук Іванни Володимирівни, необхідно визнати актуальною як з точки зору поставленої науково-практичної мети, так і з позицій застосованого для досягнення цієї мети комплексу теоретико-експериментальних підходів та методів та, що головне, у розрізі комплексу отриманих автором результатів. Необхідно наголосити, що актуальна спрямованість тематики дисертаційної роботи відображається її виконанням в рамках цілого ряду науково-дослідних проектів, що реалізувалися на кафедрі інформаційних технологій та комп'ютерної фізики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Результати роботи отримані, в тому числі, при виконанні держбюджетних тем, зокрема: "Фазоконтрастні Х-променеві томографія та інтерферометрія структурних порушень у кристалах та неоднорідностей біологічних об'єктів", "Розробка методів прецизійної Х-променевої дифрактометрії деформаційних станів епітаксіальних наноструктур з гетеровалентними переходами A_3B_5/A_2B_6 ", "Х-променево-оптична томографія полікристалічних мереж біологічних шарів", "Нові підходи у розвитку структурно-чутливої Х-променевої спектрометрії та дифрактометрії складних кристалічних сполук, тонкошарових та нанорозмірних шаруватих систем". Узагальнюючи, можна ще раз стверджувати, що дисертаційна робота є актуальною з усіх точок зору.

Наукова новизна

Наукова новизна роботи визначається поєднанням нових теоретико-методологічних аспектів (зокрема розробки алгоритмів та програмного забезпечення з використанням двовірного прямого перетворення Фур'є для дослідження енергетичного спектру муарового зображення від деформаційного поля) з сучасними прецизійними експериментальними методами (Х-променева трикристальна інтерферометрія) дозволило створенням апаратно-програмного комплексу який можна розглядати значним кроком вперед в напрямку вдосконалення рентгенівських методів діагностики структури монокристалів за умови використання динамічної теорії розсіювання рентгенівських променів реальними кристалами.

Новизна отриманих у роботі результатів стосується головним чином послідовного розвитку методологічних рішень в напрямку підвищення інформативності способів отримання з рентгенодифракційних даних параметрів реальної мікроструктури монокристалів. Зокрема, здобувачем показано можливість використання фазового зсуву для оцінки за зміною періодів муарових смуг як потужності деформаційних полів, так і характеристик загального поля зміщень. Окрім того, було встановлено загальні закономірності формування муарової картини на деформаційному полі, утвореному рядами зосереджених навантажень, орієнтованих різним чином. Серед цілої низки результатів, що володіють безсумнівними рисами наукової новизни можна виділити запропонований здобувачем новий підхід до аналізу муарових розподілів інтенсивності, базований на аналізі енергетичного Фур'є-спектру, причому було виявлено відмінності в чутливості змін спектральних характеристик до розподілу локального деформаційного поля для низько- та високо-частотних областях радіальних розподілів енергетичних спектрів муарових зображень, що є передумовою встановлення не тільки інтегральних характеристик деформацій, але й відновлення їх просторового розподілу в кристалі.

Робота містить нові наукові положення та результати у галузі фізики твердого тіла та прикладного матеріалознавства, що повністю відповідає спеціальності – 01.04.07 – фізика твердого тіла, розв'язуючи важливу науково-прикладну проблему – встановлення основних закономірностей формування муарових зображень при дифракції рентгенівських променів в реальних кристалах з наявністю деформаційних полів

Узагальнюючи, можна ще раз стверджувати, що дисертаційна робота володіє беззаперечними ознаками наукової новизни.

Загальні відомості про структуру дисертації та аналіз її змісту.

Дисертаційна робота Янчук Іванни Володимирівни викладена на 160 сторінках, складається зі вступу, чотирьох оригінальних розділів, висновків, переліку використаних першоджерел (120 найменувань). Об'єм дисертації відповідає вимогам МОН України щодо обсягів дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата наук. Дисертація містить 68 рисунки та 9 таблиць.

Достовірність і обґрунтованість наукових результатів

Одержані у дисертаційній роботі наукові результати базуються на використанні в процесі досліджень комплексу взаємодоповнюючих теоретичних та експериментальних методів, серед яких зокрема числові методи розв'язку диференціальних рівнянь у частинних похідних зі змінними коефіцієнтами, які описують динамічне

розсіяння рентгенівських хвиль реальними кристалами, ейкональна теорія розсіяння рентгенівських хвиль, трикристальна рентгенівська інтерферометрія, а також на залученні до аналізу одержаних результатів теоретичних підходів та положень, як нових, так і загальноприйнятих у фізиці твердого тіла. Обґрунтованість наукових положень та висновків дисертації зумовлена коректністю поставлених задач, правильною інтерпретацією отриманих результатів, їх узгодженістю із сучасними науковими поглядами та відомими з літератури даними інших авторів. Достовірність та надійність результатів досліджень забезпечено застосуванням сучасних вимірювальних методик, включно з комп'ютерними, отриманням відтворюваних та систематизованих експериментальних даних та узгодженістю з результатами подібних досліджень інших авторів.

Практична цінність роботи

Дисертація має фундаментальне та практичне значення як для фізики твердого тіла загалом, так і для конкретних галузей, зокрема для технології отримання функціональних монокристалічних матеріалів для мікро- та наноелектроніки. Результати роботи можуть бути застосовані для встановлення взаємозв'язку структурних змін у довільних монокристалах з технологічними умовами росту, післяростової обробки приповерхневого шару (імплантація, травлення, декорування, відпал). Особливу цікавість викликає досягнення здобувачем нового цілісного рівня узагальнення фізичних процесів, що лежать в основі механізмів формування муарової картини у слабко і сильно деформованих зосередженим навантаженням областях кристалу. Розроблені методологічні підходи значно підвищують інформативність і ефективність рентгенівських топографічних методів. Високий науковий рівень представлених у роботі матеріалів підтверджується рівнем публікацій, зроблених по темі дисертації у фахових журналах та широкою апробацією результатів досліджень на спеціалізованих конференціях та семінарах.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані при наукових дослідженнях в науково-дослідних інститутах НАН України (зокрема в Інституті металофізики, Інституті фізики напівпровідників та Інституті фізики НАН України), а також у Львівському національному університеті імені Івана Франка, Харківському національному університеті ім. Каразіна, НТУ "Харківський політехнічний інститут", ДВНЗ "Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника", Сумському державному університеті та інших закладах вищої освіти, що проводять наукові дослідження в цій галузі. Важливо, що частина отриманих автором практичних результатів стали основою для патенту на корисну модель «Спосіб визначення величини деформаційних полів кристала на основі X-променевого муарового зображення в кремнієвому LLL-інтерферометрі».

Зауваження та загальна оцінка роботи.

Загалом, дисертаційна робота Янчук Іванни Володимирівни є завершеним у межах поставлених завдань фундаментальним науковим дослідженням із вираженим практичним застосуванням, яке позбавлене суттєвих хиб та принципових недоліків. Разом із тим, при детальному ознайомленні із викладеним дисертаційним матеріалом виникла низка зауважень:

1. Підкреслюючи важливість та новаторство застосованого здобувачем підходу до аналізу спектрів муарових зображень з застосуванням двовірного прямого Фур'є-перетворення хочеться почути ширшу аргументацію переваг використання при аналізі амплітудного спектру радіального розподілу інтенсивності з усередненням за всіма напрямками, а не окремих перерізів, які б дозволили отримати інформацію про анізотропний характер впливу загального поля зміщень, утворених дією ряду зосереджених навантажень (параграф 2,2 дисертаційної роботи).
2. Продовжуючи це питання – на отриманих радіальних розподілах спостерігаються осциляції, які згладжувалися з використанням апроксимації поліномами 20-го степеня з наступною обробкою функціональних залежностей. Чи робилися спроби аналізу залежності осциляційної структури від характеристик локальних навантажень і чи очікується зв'язок між характеристиками радіального розподілу та розподілами локальних навантажень, а також орієнтації їх ряду відносно вектора дифракції H_{220} ?
3. Результатом аналізу муарових картин за допомогою параметрів енергетичного спектру є встановлення діапазонів просторових частот, в яких радіальні спектри проявляють різну чутливість до характеру розподілу зосереджених навантажень. В дисертаційній роботі (параграф 3.7) описується алгоритм встановлення взаємозв'язку між характером розподілу навантажень та параметрами радіального розподілу, проте бажано було б чіткіше окреслити критерії визначення меж цих діапазонів, а також точність визначення цієї характеристики.
4. Залежність фрактальної спектральної розмірності лінійних перерізів інтенсивності муарових розподілів є немонотонною функцією відстані між рядами з наявністю чітко вираженого максимуму. Хотілося б почути вичерпне пояснення щодо такого характеру зміни фрактальної розмірності.

Хочу наголосити на тому, що сформульовані вище запитання стосовно змісту дисертації Янчук Іванни Володимирівни носять дискусійний характер і ніяким чином не знижують загальну високу оцінку результатів роботи. Засвідчую, що дисертаційна робота є самостійним і завершеним (в межах поставлених задач) кваліфікаційним дослідженням.

Результати дисертаційної роботи викладено в 20 опублікованих працях, з них шість статей у фахових наукових журналах та 13 матеріалів і тез наукових конференцій. Важливо, що результати роботи зафіксовані в патенті на корисну модель. Зміст і основні положення дисертації в повному обсязі відображено в її авторефераті.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Янчук Іванни Володимирівни є завершеним у межах поставлених задач науковим дослідженням, роботу виконано на високому науково-методичному рівні, що відповідає вимогам сучасної експериментальної фізики твердого тіла.

За актуальністю тематики, науковою новизною та значимістю одержаних результатів, їх обсягом, вірогідністю та ступенем обґрунтованості, сформульованих

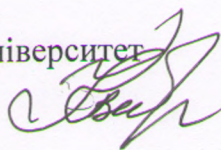
наукових висновків і рекомендацій, повнотою їх викладу в опублікованих працях дисертаційна робота «Фазоконтрастні x-променеві томографія та інтерферометрія структурних порушень у кристалах» задовольняє встановленим критеріям МОН України щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата наук, а саме, пп. 9, 11-13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України №656 від 19.08.2015, №1159 від 30.12.2015, №567 від 27.07.2016, №943 від 20.11.2019 та №607 від 15.07.2020).

Вважаю, що авторка дисертаційної роботи Янчук Іванна Володимирівна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.071 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент:

Доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри матеріалознавства
і новітніх технологій

ДВНЗ "Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника"



Коцюбинський В.О.

