

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені Юрія Федьковича

Янчук Іванна Володимирівна



УДК 548.734

**ФАЗОКОНТРАСТНІ Х-ПРОМЕНЕВІ ТОМОГРАФІЯ
ТА ІНТЕРФЕРОМЕТРІЯ СТРУКТУРНИХ ПОРУШЕНЬ
У КРИСТАЛАХ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Чернівці – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі інформаційних технологій та комп'ютерної фізики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, доцент
Новіков Сергій Миколайович,
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича, завідувач кафедри будівництва

Офіційні опоненти: Член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор
Кладько Василь Петрович,
Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова
НАН України (м. Київ), завідувач відділу дифракційних
досліджень структури напівпровідників

доктор фізико-математичних наук, професор
Коцюбинський Володимир Олегович,
ДВНЗ "Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника" (м. Івано-Франківськ), профе-
сор кафедри матеріалознавства і новітніх технологій

Захист відбудеться "07" травня 2021 року о 17⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 76.051.01 у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича за адресою: 58013, м. Чернівці, вул. Рівненська 14, корпус 8А, ауд.206.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, вул. Лесі Українки, 23.

Відгуки на автореферат просимо надсилати за адресою: Ученому секретарю спецради Д 76.051.01, вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, 58002.

Автореферат розісланий "06" квітня 2021 р.

Т.В.О. Ученого секретаря
спеціалізованої вченої ради



В.А. Головацький

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження закономірностей формування X -хвильових інтерференційних картин в аналізаторі LLL -інтерферометра, в якому створюється задане деформаційне поле, є важливим підґрунтям для подальшої розробки методів розв'язку обернених задач – встановлення з експериментальних муарових зображень величини і просторового розподілу деформаційного поля, що має важливе наукове та практичне значення.

Відомо, що X -променева багатокристална інтерферометрія базується на основних законах оптики, проте принципи формування X -променевого зображення дещо інші – складніші [1*]. Формування інтерферометричної картини відбувається внаслідок дифракції X -хвиль в окремих блоках на кристалічних ґратках (які можуть мати дилатаційні та ротаційні зміни у періодах) і їх інтерференції в аналізаторі інтерферометра. Основна проблема – фазова невідповідність.

Дослідження показали, що метод X -хвильової інтерферометрії володіє надзвичайно високою чутливістю до порушень кристалічної структури [2*]. Наразі X -променева інтерферометрія має важливе практичне застосування в метрології, зокрема, для визначення постійної Авогадро та стандартизації довжин X -хвиль [3*]. Вона також є потужним засобом дослідження медичних та біологічних зразків у фазовій томографії. Використання комбінованої оптичної та X -променевої інтерферометрії в [4*] дало змогу виявити незначний вплив поверхневого тиску на міжплощинні віддалі кристалу кремнію.

Натомість наявні дефекти структури і макродеформації в пластинах інтерферометра суттєво впливають на якість результатів досліджень.

Розвиток динамічної теорії X -хвиль на даний час дозволяє провести необхідні числові моделювання муарових картин із заданим полем деформацій [6*]. Значно спростити задачу вивчення комбінованого впливу дефектів на дифракцію X -хвиль у реальному кристалі можна шляхом моделювання у спеціально підібраних умовах, де дифракційні ефекти проявляються більш в повній мірі, а вплив зовнішніх чинників керований. У цьому випадку найбільш ефективним є застосування модельних рядів із зосереджених навантажень (ЗН), що дозволяє створювати в кристалі довгоперіодні та локалізовані поля деформацій. За такого підходу при аналізі експериментальних муарових картин можна отримати необхідну кількісну інформацію про джерела залишкових або діючих деформацій та їх розподіл, а також про характер їх можливого взаємовпливу.

Отже, дослідження закономірностей формування X -хвильових інтерференційних картин в аналізаторі LLL -інтерферометра, в якому створюється задане деформаційне поле, є важливим та актуальним завданням для подальшої розробки методів розв'язку обернених задач – встановлення з аналізу експериментальних муарових картин (МК) величини і просторового розподілу деформаційного поля, і як наслідок, визначення всіх компонент тензора деформацій, що є вже можливим в оптичній інтерферометрії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дослідження, представлені у дисертаційній роботі, виконано відповідно до програм наукової тематики 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.).
- "Розробка методів прецизійної X -променевої дифрактометрії деформаційних станів епітаксіальних наноструктур з гетеровалентними переходами A_3B_5/A_2B_6 " (№ державної реєстрації 0114U003702, 2014-2015 рр.).
- " X -променево-оптична томографія полікристалічних мереж біологічних шарів" (№ державної реєстрації 0117U001149, 2017-2019 рр.).
- "Нові підходи у розвитку структурно-чутливої X -променевої спектрометрії та дифрактометрії складних кристалічних сполук, тонколіткових та нанорозмірних шаруватих систем" (№ державної реєстрації 0119U100731, 2019-2021 рр.).

Метою дисертаційної роботи є встановлення особливостей формування муарових зображень, що виникають у деформаційному полі, утвореному при дії одновимірних рядів локальних зосереджених навантажень на вихідну поверхню аналізатора трикристального LLL -інтерферометра для випадків їх орієнтації паралельно або перпендикулярно вектору дифракції.

Для досягнення поставленої мети було визначено наступні завдання:

1. Розробка моделей із певним чином розподіленими наборами $3H$ для дослідження впливу довгоперіодних або локалізованих деформаційних полів на дифракційні та інтерференційні процеси X -хвиль в LLL -інтерферометрах.
2. Розробка алгоритмів та програмного забезпечення з використанням двомірного прямого дискретного швидкого перетворення Фур'є для дослідження енергетичного спектру Фур'є муарового зображення від величини $3H$.
3. Дослідження впливу на формування муарових картин (МК) деформаційного поля, утвореного рядами із $3H$, які різняться величиною та розподілом навантажень.
4. Встановити взаємозалежність значень середніх просторових частот енергетичних спектрів муарових зображень та величини деформаційного поля, породженого сумарною дією $3H$.
5. Розробити алгоритм відтворення величини сумарного навантаження у рядах із $3H$ за допомогою аналізу параметрів енергетичного спектру M_3 .
6. Дослідити ступінь чутливості до характеру розподілу локальних джерел деформацій у низько- та високочастотних діапазонах радіальних розподілів енергетичних спектрів M_3 .
7. Встановити особливості формування муарових картин, які виникають на деформаційному полях, утворених окремими рядами при заданих розподілах $3H$: паралельному, перпендикулярному та під кутом до вектору дифракції \vec{H}_{220} .

8. Дослідити взаємозв'язок змін в структурі муарових смуг МС при зміні відстані між джерелами деформацій, утворених окремими (паралельними або перпендикулярними рядами із ЗН, а також на їх фрактальну спектральну розмірність.

Об'єкт дослідження – X -хвильові муарові зображення деформаційних полів, утворених окремими рядами із ЗН за заданим їх розподілом та величиною, а також системами із окремих рядів ЗН, по різному орієнтованих один по відношенню до іншого і рознесених на різні відстані.

Предмет досліджень – механізми та закономірності формування муарових зображень деформаційних полів, що виникають при дії різних за величиною та розподілом ЗН на вихідній поверхні аналізатора LLL -інтерферометра.

Методи дослідження: числові методи розв'язку диференціальних рівнянь у частинних похідних зі змінними коефіцієнтами, які описують динамічне розсіювання X -хвиль реальними кристалами, ейкональна теорія розсіювання X -хвиль, X -променева трикристальна інтерферометрія, Фур'є-аналіз.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що *вперше*:

1. Показано, що наявність фазового зсуву є своєрідним зондом, за допомогою якого можна оцінити не тільки деформаційну потужність окремих ЗН зі зміни періодів муарових смуг, а також визначити характер зміни сумарного деформаційного поля. Форма муарових смуг відображає загальне поле зміщень $\bar{U}(\vec{r})$, утворене дією ряду зосереджених навантажень. Зменшення зворотної величини періоду муарових смуг $\Lambda(x)$ при віддаленні від крайнього зосередженого навантаження в ряду відображає залежність сумарного деформаційного поля $\partial U_x(x)/\partial x$ і має гіперболічний характер спадання.

2. Встановлено, що X -променеві муарові зображення суттєво залежать від величини та характеру розподілу ЗН. 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 ЗН P_{NL} , які стали причиною виникнення деформацій.

3. 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.

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

деформаційному полі.

Сформована таким чином система МС, яка хоча і зберігає деякі характерні риси для кожного із вертикальних та горизонтальних рядів, проте у цілому відображає результуюче деформаційне поле утворене ними.

Практичне значення отриманих результатів. Досягнутий рівень розуміння фізичних процесів формування муарових смуг у слабко і сильно деформованих зосередженим навантаженням областях кристалу підвищує інформативність і ефективність X -променевих топографічних методів.

Встановлені механізми формування зображень деформаційних полів, що виникають при дії локальних ЗН на муарових картинах можуть бути використані для створення нових методів структурної діагностики високодосконалих кристалічних матеріалів.

Результати, отримані у дисертації, можуть бути використані у навчальному процесі, зокрема у таких спецкурсах: "Комп'ютерне моделювання процесів розсіяння", "Дефекти в кристалах", "Фізика твердого тіла", "X-променевий структурний аналіз" тощо.

Обґрунтованість і достовірність результатів. Викладені в дисертаційній роботі завдання, наукова новизна та висновки обґрунтовані з точки зору динамічної теорії розсіяння X -хвиль, а співставлення з експериментальними результатами підтверджує їх.

Особистий внесок здобувача. Дисертантка брала активну участь у постановці задач, обговоренні та інтерпретації результатів в усіх опублікованих у співавторстві роботах [1-20]. У роботах [1, 10, 11] брала участь у вдосконаленні алгоритму розрахунків дифракційних зображень. У роботах [2-4, 14, 15] проводила числові розрахунки, брала участь в аналізі отриманих результатів, здійснювала цифрову обробку експериментальних зображень. У роботах [5, 6, 18-20] здійснювала адаптацію алгоритму двомірного прямого дискретного швидкого перетворення Фур'є для задач інтерферометрії, розрахунки та аналіз отриманих результатів. У роботі [7] здійснено патентний пошук. Результати дисертації [8-20] доповідались і обговорювались на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень, викладені в дисертації, доповідались і обговорювались на:

XIV міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок та наносистем (МКФТТПН-XIV), 20-25 травня 2013, Івано-Франківськ, Україна.

VI Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-6, 30 вересня – 4 жовтня 2013, Чернівці, Україна.

The 11th International Conference "Correlation Optics", 18-21 September 2013, Chernivtsi, Ukraine.

12th Biennial Conference on High-Resolution X-Ray Diffraction and Imaging ХТОР 2014, 14-19 September 2014, Villard de Lans, France.

Physical and technological problems of radio engineering devices, telecommu-

nication, nano-and microelectronics, 23-23 October 2014, Chernivtsi, Ukraine.

XV міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок та наносистем (МКФТТПН-XV), 11-16 травня 2015, Яремча, Україна.

The 12th International Conference "Correlation Optics 2015", 14-18 September 2015, Chernivtsi, Ukraine.

13th Biennial Conference on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging ХТОР 2016, 4-8 September 2016, Brno, Czech Republic.

VII українська наукова конференція з фізики напівпровідників "УНКФН-7", 26-30 вересня 2016, Дніпро, Україна.

XVI міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок та наносистем (МКФТТПН-XVI-ICPTTFN), 15-20 травня 2017, Івано-Франківськ, Україна.

14th Biennial Conference on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging ХТОР 2018, 3-7 September 2018, Bari, Italy.

XVII міжнародна Фреїківська конференція з фізики і технології тонких плівок та наносистем (МКФТТПН-XVII), 20-25 травня 2019, Івано-Франківськ, Україна.

14th International Conference on Correlation Optics, 16-19 September 2019, Chernivtsi, Ukraine.

Публікації. У дисертації узагальнено наукові результати, опубліковані у 20 працях, з них – 6 статей у міжнародних та вітчизняних фахових виданнях [1-6], 1 патент на корисну модель [7], 13 тез доповідей на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях [8-20].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, які присвячені основним результатам роботи, висновків, списку цитованої літератури та додатків. Загальний обсяг роботи – 160 сторінок машинописного тексту, містить 9 таблиць та 68 рисунків. Список цитованої літератури містить 120 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовується актуальність обраної теми досліджень, сформульовані мета й основні задачі, вказані наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, наведені дані про апробацію роботи, публікації, особистий внесок дисертанта.

У першому розділі проведено аналіз літературних джерел присвячених науковим та практичним сторонам використання X-променевої багатокристалльної інтерферометрії, наведені приклади областей її застосування. Відзначається, що успіхи у розвитку динамічної теорії розсіяння X-променів стали важливими факторами для розробки високочутливих методів дослідження структурної досконалості кристалів.

У слабо деформованих кристалах або на значній відстані від джерела деформації амплітуди хвильових полів повільно змінюються і формування муарової картини пов'язано, в основному, з їх фазовою невідповідністю. Це дозволяє використовувати ейкональне наближення для опису хвильового поля, в якому

вектор дифракції \vec{H} є функцією просторових координат і грає роль повільно змінюваного показника заломлення [6*]. У цьому випадку розмір неоднорідності L перевищує так звану екстинційну довжину Λ (Λ порядку 5-20 мкм). У загальному випадку розсіяння X -променів на дефектах у кристалах та формування дифракційного контрасту описується системою диференціальних рівнянь гіперболічного типу, що отримали назву рівнянь Такагі. По виду функції, яка описує локальні розорієнтації $\alpha(\vec{r})$ відбивних площин поблизу дефектів, можна розрахувати хвильові поля всередині кристала і побудувати їх дифракційні зображення. Як правило, використовуються числові методи розв'язку рівнянь Такагі [1-4].

Оскільки X -променева інтерферометрія базується на основних законах оптики, то дослідження закономірностей формування інтерференційних картин X -хвиль в аналізаторі LLL -інтерферометра, в якому створюється задане деформаційне поле, є важливим підґрунтям для подальшої розробки методів по відтворенню розподілів деформаційних полів та визначенню компонент тензора деформацій створюваних дефектами [5*, 6*].

У другому розділі представлені результати моделювання муарових розподілів інтенсивності для різних випадків впливу на їх формування деформаційного поля, утвореного системою зосереджених навантажень, діючих на вихідну поверхню кристала-аналізатора LLL -інтерферометра. Досліджено вплив різних за сумарною величиною та значеннями окремих ЗН при рівномірному розміщенні у рядах на формування відповідної геометрії інтерференційної картини. Розв'язується так звана пряма задача – підгонка можливого розподілу джерел деформацій за величиною та різним їх розподілом на основі розробленого раніше алгоритму чисельного моделювання X -променевої муарових розподілів інтенсивності [6*] до експериментальних, отриманих в [5*].

Досліджуються закономірності формування МК на деформаційному полі, утвореному одномірним рядом при рівномірному розподілі зосереджених навантажень при різних значеннях навантаження. Розглянуто 6 можливих варіантів рядів розподілу ЗН за величиною навантаження (рис. 1).

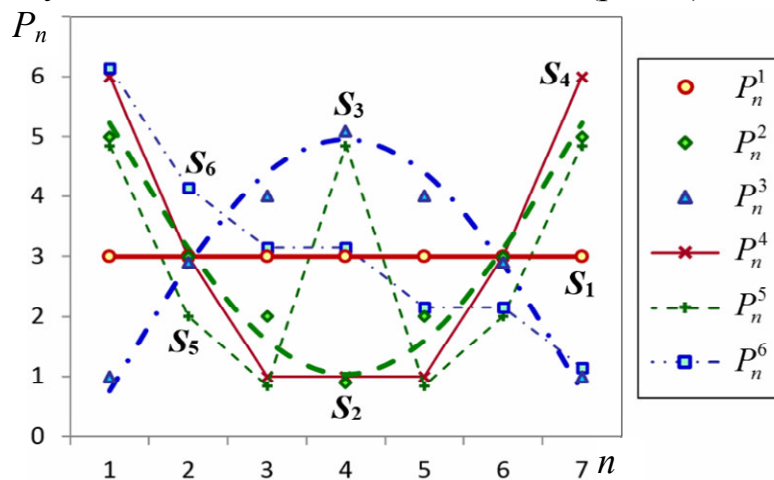


Рис. 1. Розподіли ЗН $P_n^1 - P_n^6$ (з формами $S_1 - S_6$) в рядах при сумарній $P_{NL} = 21$; n – номер локального навантаження; маркерами позначені значення ЗН в рядах, для яких розраховані МЗ на рис.2 ($P_{NL} = 147$)

Вигляд муарових зображень (МЗ) залежить не тільки від величини сумарної потужності ЗН, але і від характеру розподілу їх деформацій та зміщень у ряду (рис. 2).

Розподіли локальних навантажень P_n в ряді апроксимовано синусоїдами:

$$P_n = \left(A_{Pt} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot (n-1)}{T_P-1}\right) + 0.5 - a_{PN} \right) \cdot \frac{2P_{NL}}{N}, \quad (1)$$

де n – номер локального навантаження, $n = 1, \dots, N$; $T_P = 2N - 1$ – період синусоїди, яка описує розподіл навантажень; A_{Pt} – теоретична амплітуда синусоїди, P_{NL} – сума ЗН у ряду; $a_{PN} = \frac{1}{N} \sum_{n_1=1}^N A_{Pt} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot (n_1-1)}{T_P-1}\right)$ – середнє арифметичне N значень синусоїди з амплітудою A_{Pt} .

На рис. 2 розрахована серія X -променевиx МЗ $R_h(x, y)$ при дії N ЗН на вихідну поверхню аналізатора LLL -інтерферометра. ЗН у ряді розміщені через 800 мкм паралельно вектору дифракції \vec{H}_{220} вздовж відрізка прямої (рис. 2). При сумі N таких ЗН, наприклад, $P_{NL} = 100$ у відносних одиницях (фігурують у підписах до рис. 2), значення $P_d = 0,08$ Н/м, що відповідає області слабких деформацій.

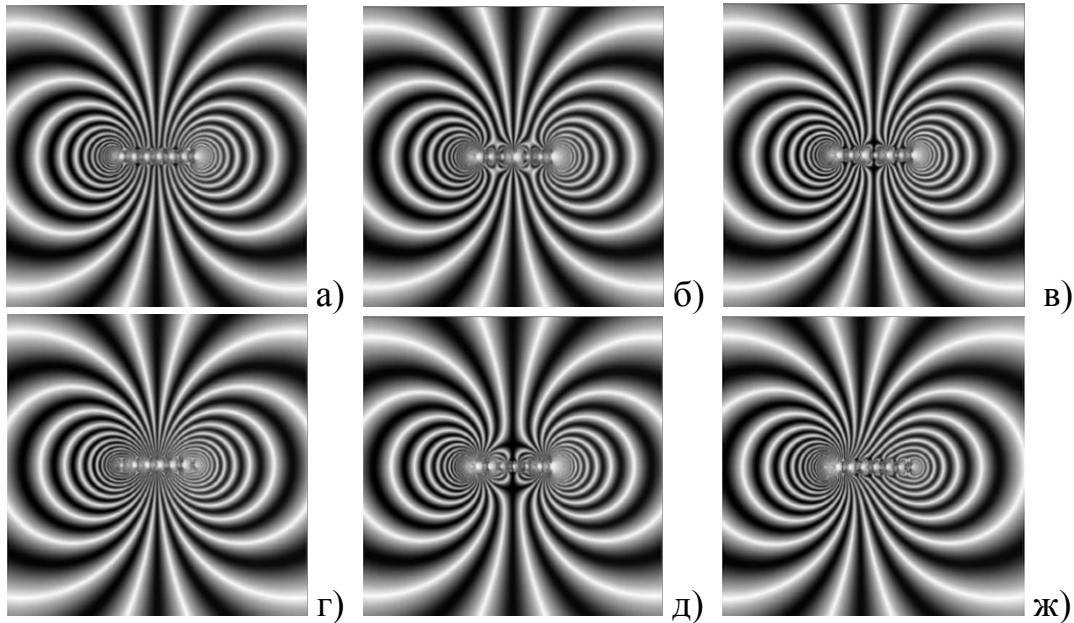


Рис. 2. Муарові розподіли $R_h(x, y)$ ($P_{NL} = 147$) для шести варіантів розподілу ЗН: а) S1: (21-21-21-21-21-21-21); б) S5: (35-14-7-35-7-14-35); в) S7: (28-14-28-7-28-14-28); г) S3: (7-21-28-35-28-21-7); д) S4: (42-21-7-7-7-21-42); ж) S6: (42-28-21-15-15-13-8)

На муарових розподілах інтенсивності $R_h(x, y)$ в залежності від значення ЗН спостерігається зародження так званих деформаційних муарових смуг в перехідній по знаку області (стиск-розтяг). Окремі муарові смуги формуються в тих областях поблизу ЗН, де максимальна швидкість зміни фази. При цьому, формування системи темно-білих МС навколо кожної ЗН симетричне щодо центрального навантаження і відображає характер взаємодії (суперпозиції) їх

деформаційних полів.

Величина навантаження не змінює загальну форму деформаційного поля, а тільки збільшує її абсолютні значення в кожній точці в об'ємі кристалу. У випадку, коли окремі ЗН не може створити окремих умов для виникнення нової МС, то такі умови створюються двома сусідніми ЗН. Зі збільшенням навантаження умови виникнення МС може задовольнити окремо деформаційне поле в околі окремого ЗН (хоча воно є сумою полів від усіх ЗН), і тоді формується у центральна муарова смуга.

На рис.3г муарові смуги сформовані поблизу крайніх у ряду ЗН зменшуються за періодом, але їх кількість не змінюється. Наявність фазового муару є своєрідним зондом, який за зміною періодів $\Lambda_D(x)$ деформаційних або фазових муарових смуг дозволяє оцінити не тільки деформаційну "потужність" крайніх у ряду ЗН, а також визначити характер спадання сумарного деформаційного поля.

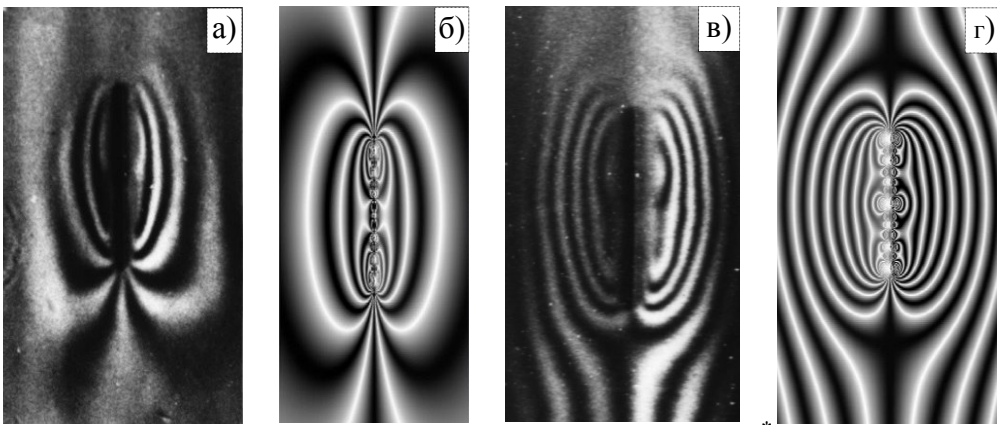


Рис. 3. а), в) – експериментальні муарові зображення [5*] подряпин, перпендикулярних \vec{H}_{220} , випромінювання $\text{CuK}_{\alpha 1}$; б), г) розраховані зображення в залежності від розподілу ЗН у рядах: в) без структурованого муару; в), г) зі структурованим муаром $\Lambda = 1200$ мкм

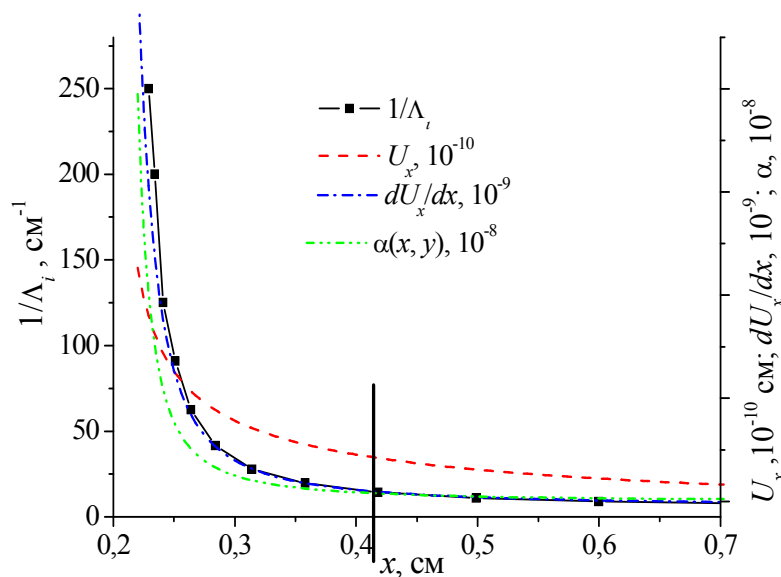


Рис. 4. Залежності (вздовж осі Ox усереднених в межах області $y_0 = \pm 30$ мкм): періоду $1/\Lambda_i$; U_x ; dU_x/dx ; функції $\alpha(x, y)$. Суцільна лінія розділяє області прояву "деформаційного" та структурного муару

Оскільки, зміна періоду муарових смуг пов'язана з деформацією $\varepsilon(x)/d = 1/\Lambda(x)$, то проведено зіставлення у відповідних масштабах $\varepsilon(x)$, зміщень $U_x(x)$, $\partial U_x(x)/\partial x$ та локальних розорієнтацій $\alpha(x)$ (рис. 4). Найкраща якісна відповідність характеру спадання $1/\Lambda(x)$ дає $\partial U_x(x)/\partial x$ (рис. 4). При цьому $1/\Lambda(x)$ без та при наявності фазового муару фактично є взаємодоповнюючими.

Аналіз амплітудних спектрів Фур'є F_A та їх радіальних розподілів F_R муарових картин (рис. 2) від сумарних значень ЗН P_1-P_N , показує, що інтегральні параметри спектрів, такі як їх середня радіальна частота, чутливі у першу чергу до сумарної величини P_{NL} (рис. 5).

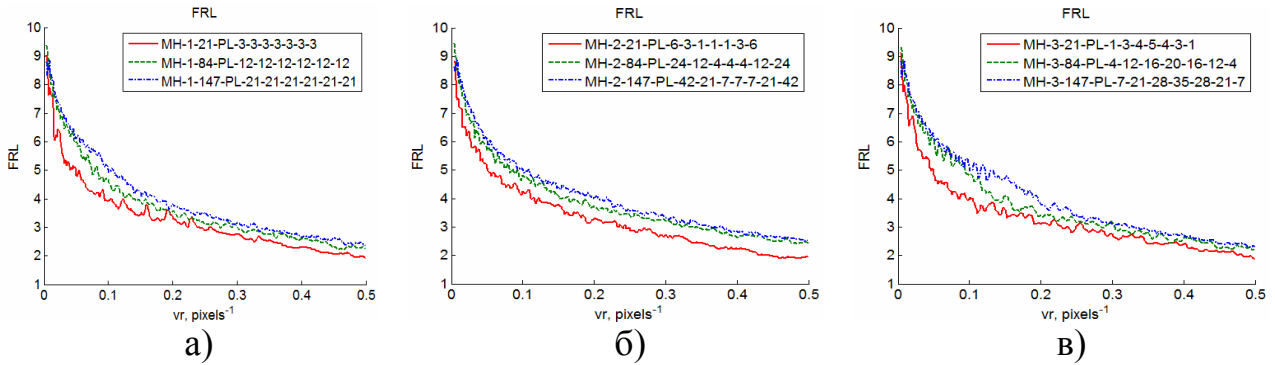


Рис. 5. Радіальні розподіли F_R для F_A (рис. 2, згруповані за формою розподілів: а) S_1 , б) S_2 , в) S_3 . F_{RL} – радіальні розподіли F_R у логарифмічному масштабі від величини навантаження

Аналіз муарових зображень, розрахованих при різних сумах ЗН P_{NL} дозволив встановити кореляцію між значеннями $\bar{\nu}_R$ та P_{NL} . Завдяки цьому стало можливим обчислити значення суми ЗН P'_{NL} на основі частоти $\bar{\nu}_R$ з використанням кусково-лінійної апроксимації. Проте, не виявило кореляцію між частотою $\bar{\nu}_R$ та характером розподілу ЗН P_n .

В третьому розділі на основі методу енергетичного спектру Фур'є представлено нові підходи до аналізу експериментальних муарових картин, отриманих за допомогою *LLL*-інтерферометра. Різна чутливість до характеру розподілу локальних джерел деформацій у низько- та високочастотних діапазонах частот радіальних розподілів енергетичних спектрів муарових зображень створила нові можливості визначення величини сумарної деформації та їх розподілу в кристалі.

Пропонований метод полягає у розробці теоретичного підходу для обчислення розподілу ЗН P_n на основі параметрів муарових зображень. Для знаходження таких залежностей проведено аналіз серії еталонних зображень (рис. 2). Встановлення взаємозв'язку між характером P_n та значеннями радіального розподілу P_R виконано шляхом аналізу форми P_R в різних діапазонах частот ν_r . При цьому, для залежності $P_R(\nu_r)$ проведено аналіз не тільки розподілів P_R (які містять високочастотні осциляції), а також розподілів P_{Rp} , які отримуються перетворенням P_R до логарифмічного масштабу та апроксимацією поліномом 20-ї степеня (рис. 6).

Встановлено, що розподіли $P_{Rp}(v_r)$ проявляють різну чутливість до характеру розподілу ЗН у двох діапазонах частот (рис. 6). Зокрема, це низькочастотний діапазон №1, який обмежується просторовими частотами $[v_{S1}, v_{S2}]$, та високочастотний №2, який обмежується частотами $[v_{S2}, v_{S3}]$.

Для кожної суми ЗН P_{NL} визначено значення частот v_{S1} , v_{S2} та v_{S3} , відповідно, які є абсцисами точок перетину розподілів P_{Rp} з формами розподілу навантажень S_1 та S_3 (рис. 6).

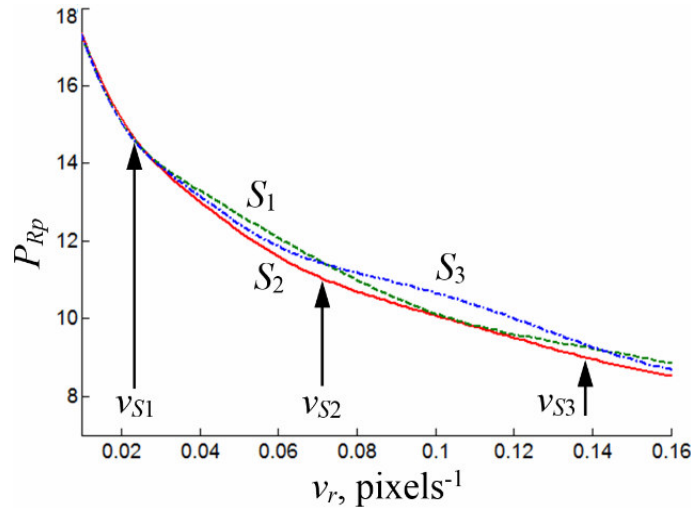


Рис. 6. Фрагменти апроксимованих радіальних розподілів $P_{Rp}(v_r)$ енергетичних спектрів P_S муарових зображень в напівлогарифмічному масштабі з частотами меж діапазонів $v_{S1} - v_{S3}$; $P_{NL} = 105$; S_1 , S_2 та S_3 – форми розподілів ЗН

На рис. 7 наведено отримані залежності меж діапазонів v_{S1} , v_{S2} , v_{S3} від суми ЗН P_{NL} для множини еталонних муарових зображень. Такі залежності (шляхом кусково-лінійної апроксимації) використано для обчислення частот (v_{S1} , v_{S2} , v_{S3}) для довільних P_{NL} .

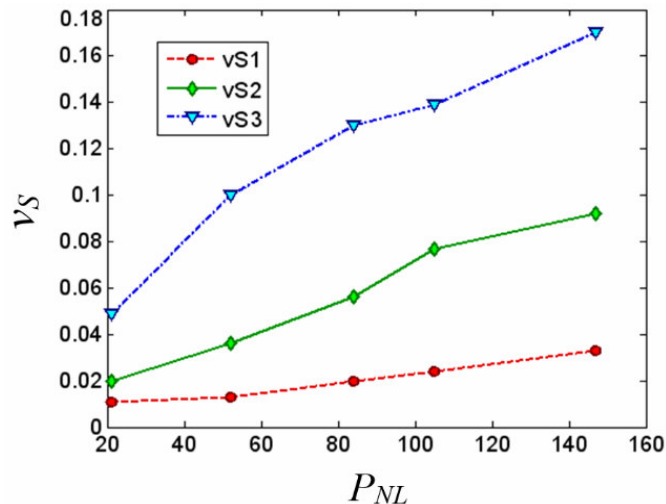


Рис. 7. Залежності меж діапазонів $v_{S1}(P_{NL})$, $v_{S2}(P_{NL})$, $v_{S3}(P_{NL})$ для муарових зображень (рис. 2)

У межах обчислених діапазонів частот $[v_{S1}, v_{S2}]$ та $[v_{S3}, v_{S3}]$ оцінено значення відносних площ S_{R1} та S_{R2} для радіального розподілу $P_R(v_r)$. Для МЗ з однаковими значеннями P_{NL} значення S_{R1} та S_{R2} усереднюються. У результаті отриму-

ються середні площі S_{A1} та S_{A2} , відповідно. Шляхом кусково-лінійної апроксимації отриманих залежностей $S_{A1}(P_{NL})$ та $S_{A2}(P_{NL})$ на основі P_{NL} визначаються апроксимовані середні площі S_{A1}^a та S_{A2}^a .

Розподілам ЗН з формами S_1 , S_2 та S_3 відповідають теоретичні амплітуди синусоїд A_P . Для отримання однозначної залежності A_P від параметрів енергетичного спектру МЗ введено параметр S_{P3} , який визначається лінійною комбінацією S_{P1} та S_{P2} з використанням пропорцій золотого перерізу за співвідношенням:

$$S_{P3} = S_{P1} \cdot 0,618 + S_{P2} \cdot 0,382. \quad (2)$$

Співвідношення (2) забезпечує наступні умови при: $S_{P3} = 1$ матимемо рівномірну форму S_1 розподілу ЗН ($A_P = 0$); значенню $S_{P3} < 1$ відповідає форма S_2 з мінімумом у центрі ($A_P < 0$); значенню $S_{P3} > 1$ – форма S_3 з максимумом у центрі ($A_P > 0$). На основі значень $S_{P3}(A_P)$ встановлена емпірична залежність відновленої амплітуди синусоїди A_{Pr} від параметру S_{P3} енергетичного спектру (3), яка описує розподіл P_n

$$A_{Pr} = 2 \left(\frac{1}{1 + \exp(-(S_{P3} - 1) \cdot C_1)} - \frac{1}{2} \right), \quad (3)$$

де для нашого випадку $C_1 = 43$ (при $S_{P3} \leq 1$) або $C_1 = 14$ (при $S_{P3} > 1$).

Залежність $A_{Pr}(S_{P3})$ забезпечує зміну A_{Pr} у допустимому діапазоні від -1 до 1 для довільних S_{P3} . Водночас, залежність $A_{Pr}(S_{P3})$ для розподілів ЗН з формами S_2 та S_3 є різною, що враховано завдяки значенням коефіцієнта C_1 .

Запропонований підхід забезпечує вирішення оберненої задачі, яка полягає у знаходженні суми ЗН P_{NL} та розподілу ЗН P_n , де $n = 1, \dots, N$, на основі аналізу МЗ. Алгоритм цього підходу є наступним. Спочатку визначаються сумарне значення ЗН P_{NL}^r на основі середніх частот $\bar{\nu}_R$ радіального розподілу P_R . Розподіл ЗН P_n , де $n = 1, \dots, N$, визначається на основі аналізу форми P_R . Значення ЗН P_n (сума яких дорівнює P_{NL}) описуються синусоїдою з амплітудою A_{Pr} і періодом $T_P = 2N - 1$, а амплітуда A_{Pr} обчислюється на основі P_R за співвідношенням (3).

У результаті рис. 8а на основі аналізу муарових зображень (рис. 2) відновлено розподіли ЗН P_n .

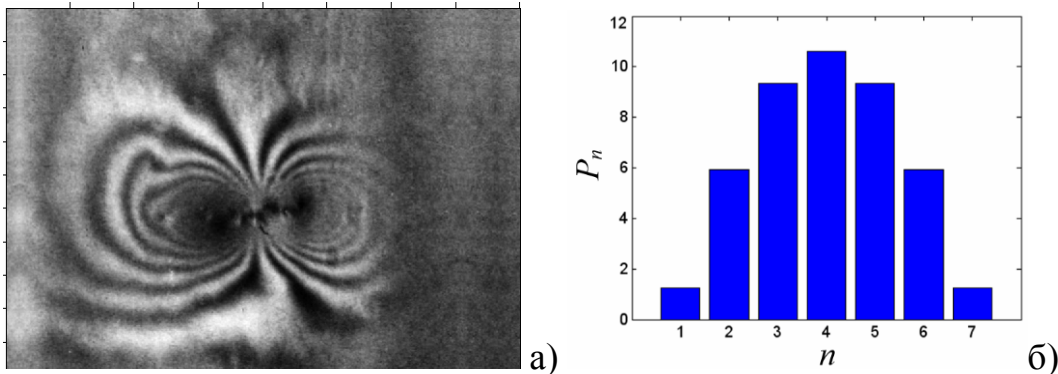


Рис. 8. а) експериментальне МЗ, зумовлене залишковими деформаціями, які виникли внаслідок дії індентора на аналізатор LLL -інтерферометра [5];

б) відтворений розподіл ЗН: $P_{NL}^r = 43,7$, $P_d = 0,035$ Н, $A_{Pr} = 0,75$

Отримано задовільне узгодження відновлених значень ЗН P_{nr} з теоретичними P_{nt} не тільки для еталонних зображень і форм розподілів S_1, S_2, S_3 , але й для тестових зображень і нових форм розподілів. Середня квадратична похибка, отримана між значеннями P_{nr} та P_{nt} для тестових зображень ($P_{NL} = 21, \dots, 147$), є допустимою (абсолютна похибка $R_p = 2,3$, відносна похибка $\varepsilon_p = 2,7\%$). Це підтверджує універсальність даного методу при реконструкції різноманітних форм розподілів навантажень.

При аналізі експериментальних МЗ (рис. 8а), отриманих в роботі [5*], за допомогою даного методу оцінено не тільки сумарну величину залишкових ЗН P'_{NL} , але й можливий їх розподіл ЗН P_{nr} (рис. 8б).

Отримані значення суми ЗН ($P'_{NL} = 43,7$) є близькими до результатів незалежного методу ($P_{NL} = 41,7$), а відносна похибка обчислення суми ЗН становить $\varepsilon_{PL} = 4,6\%$. Відновлена форма розподілу ЗН (рис. 8б) також узгоджується з результатами незалежних методів, що підтверджує коректність та перспективність запропонованого підходу до аналізу муарових зображень.

У четвертому розділі досліджуються особливості формування муарових картин у випадку суперпозиції далекодіючих деформаційних полів, утворених окремими, по різному орієнтованими, протяжними джерелами деформацій. Для цього використано підходи, розглянуті у другому та третьому розділах при аналізі муарових зображень, утворених окремими розподілами зосереджених навантажень. Розраховано муарові зображення деформаційних полів у кристалі, що виникають при різних орієнтаціях двох рядів та певних розподілах у них зосереджених навантажень, зокрема, перпендикулярно до поверхні аналізатора, а лінії розташування ЗН орієнтовані між собою: паралельно, під кутом та перпендикулярно.

Збільшення відстані L_r між рядами призводить до появи додаткових колоноподібних муарових смуг (рис. 9а), які формуються у вигляді симетричних фігур, подібних до цифри "8" на деформаційному полі, утвореному в області перших та останніх ЗН у рядах. Між цими фігурами формуються вертикальні муарові смуги, які виникають на деформаційному полі поблизу ЗН у нижній частині верхнього ряду та верхній частині нижнього. При віддаленні від рядів ЗН формування муарових смуг уже відбувається на результуючому деформаційному полі.

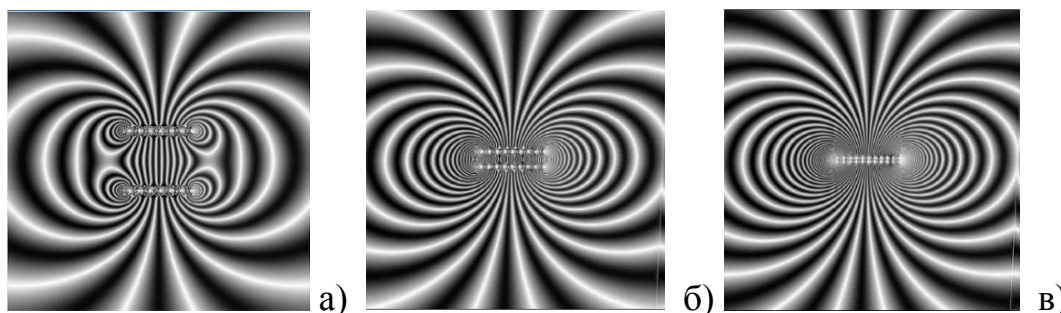


Рис. 9. $R_h(x, y)$. Розміри МК ($S_x \times S_y$) = (2×2 мм). Два ряди із ЗН паралельні до \vec{H}_{220} : а) $N = 9$ (ЗН через 400 мкм), відстань між рядами $L_r = 0,1 \cdot S_y$, $P_{\Sigma}^1 = 105$, $P_{\Sigma} = 210$; б) $L_r = 0,05 \cdot S_y$; в) $N = 11$, $P_{\Sigma} = 330$, $L_r = 0,00625 \cdot S_y$

Досліджено формування муарової картини на деформаційному полі для двох рядів з рівномірним розподілом за величиною навантаженням, розміщених під кутом до \vec{H} : а) ряди перпендикулярні та під 45° до \vec{H} ; б) 60° між рядами та 30° до \vec{H} (рис.10).

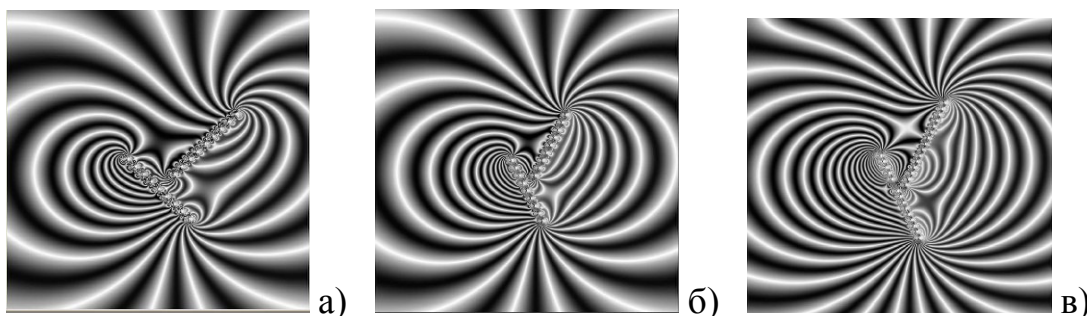


Рис.10. $R_h(x, y)$: а) $N = 9$, $P_\Sigma^1 = P_\Sigma^2 = 105$, $\psi = 90^\circ$; б) розподіл P_i^1 спадний (S6), $N = 11$, $P_\Sigma^1 = 146$, $P_\Sigma^2 = 165$; в) P_i^1 параболічний (S2) $N = 21$, $P_\Sigma^1 = P_\Sigma^2 = 289$

Формування муарової картини на деформаційному полі, утвореному двома рядами з рівномірним розподілом за величиною навантаженням, які розміщені паралельно (1-й ряд) та перпендикулярно \vec{H} : а) ряди перетинаються по центру – одна і та ж локальне навантаження є центральною у двох рядах; б), в) центральне локальне навантаження у 2-му ряді є початковою у 1-му ряді (рис. 11).

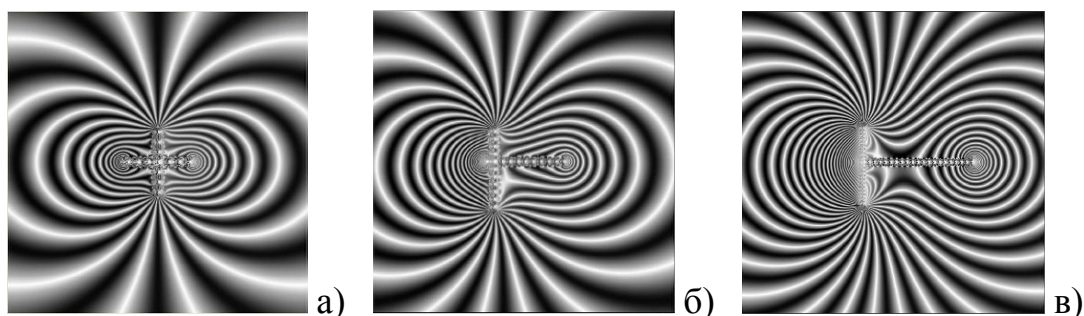


Рис. 11. МЗ без фазового муару: а) $N = 9$, $P_\Sigma^1 = P_\Sigma^2 = 135$; б) $N = 11$, P_i^1 (S6), $P_\Sigma^1 = 146$, $P_\Sigma^2 = 165$; в) $N = 15$, $P_\Sigma^1 = 230$, $P_\Sigma^2 = 225$; P_i^2 (S6), $P_\Sigma^2 = 290$

Проведено моделювання МЗ (рис. 12) для двох систем рядів з рівномірно розміщеними ЗН, і які направлені перпендикулярному та паралельно до вектору дифракції. Горизонтальна система складається з двох рядів рознесених на відстань L_i . Досліджується формування МЗ від відстані між рядами L_r . Зменшення L_r , і відповідно, збільшення взаємодії деформаційних полів, ще більш помітно відображається на формуванні всієї системи МС (рис. 12б, г). Збільшується кількість вертикальних півеліпсів та їх ра кривизна від центру. МС, огинають ряди ЗН і зближуються по центру. Можна стверджувати, що сформована таким чином система МС, яка хоча і зберігає деякі характерні риси для кожного із вертикальних та горизонтальних рядів, проте у цілому відображає результуюче деформаційне поле утворене ними.

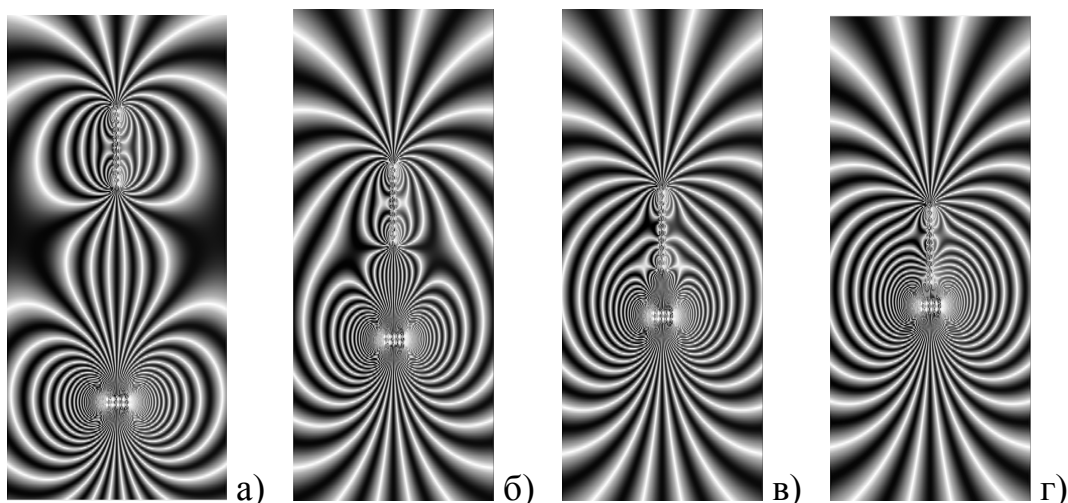


Рис. 12. $R_h^A = R_h(x, y)$. Розміри МЗ ($S_x \times S_y$): (4×8 мм). Два горизонтальні ряди: $N = 5$; $P_\Sigma^N = 260$; $L_N = 0,1 \cdot S_x$; між рядами $L_i = 0,06 \cdot S_y$. Вертикальний ряд: $N = 11$; $L_h = 0,15 \cdot S_y$; $P_\Sigma^h = 246$. Між рядами L_r у долях від S_y : а) 0,45; б) 0,25; в) 0,1; г) 0,05

Наведена на рис. 13 фрактальна розмірність демонструє не лінійну (гіперполічну) залежність зміни від відстані між рядами L_r (рис. 12), яка розрахована на основі спектрів Фур'є перетворення лінійних перерізів інтенсивності муарового зображення.

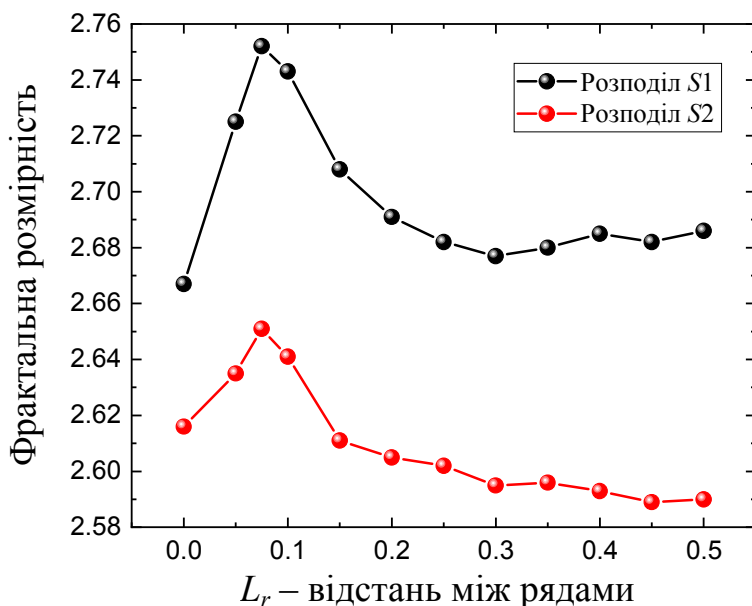


Рис. 13. Фрактальна розмірність для МЗ (рис. 12), отриманих в залежності від L_r . S1 – МЗ без, S2 – з фазовим муаром при $\Lambda = 1200$ мкм

Фрактальна розмірність характеризує ступінь самоподібності муару. Показує наскільки частина афінно-самоподібного об'єкта подібна до цілого об'єкта після його анізотропного масштабування. Максимальне значення фрактальної розмірності на рис.13 ($L_r = 0,1 \cdot S_y$) свідчить про втрату рядами окремих суб'єктів, а при $L_r = 0,05$ МЗ формується вже на їх сумарному деформаційному полі.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Дослідження закономірностей формування інтерференційних картин X -хвиль в аналізаторі LLL -інтерферометра, в якому створюється задане деформаційне поле, є важливим підґрунтям для подальшої розробки методів по відтворенню розподілів деформаційних полів та визначенню компонент тензора деформацій створюваних дефектами.

1. На інтерференційних розподілах інтенсивності в залежності від потужності зосереджених навантажень спостерігаються, як правило дві системи деформаційних муарових смуг, які формується у перехідних по знаку областях (стиск-розтяг). Перша система муарових смуг локалізується поблизу дії ЗН, де максимальна швидкість зміни фази (деформації).

Наявність фазового муару призводить до зміни (крім центрального зосередженого навантаження) чергування контрасту у системі світло-темних смуг інтенсивності, і який, водночас, є своєрідним зондом, за допомогою якого можна оцінити не тільки потужність крайніх зосереджених навантажень зі зміни періодів муарових смуг, а також визначити характер убуття сумарного деформаційного поля. Форма муарових смуг відображає загальне поле зміщень $\vec{U}(\vec{r})$, утворене дією ряду зосереджених навантажень.

2. Зменшення зворотної величини періоду муарових смуг $\Lambda(x)$ при видаленні від крайнього зосередженого навантаження в ряду відображає залежність сумарного деформаційного поля $\partial U_x(x)/\partial x$ і має гіперболічний характер спадання.

3. Аналіз амплітудних спектрів Фур'є F_A та їх радіальних розподілів F_R від сумарних значень ЗН P_1-P_N , показує, що інтегральні параметри спектрів, такі як їх середня радіальна частота, чутливі у першу чергу до суми ЗН P_{NL} .

Двомірне пряме дискретне швидке перетворення Фур'є муарових розподілів інтенсивності дозволяє за характерними особливостями спектрів Фур'є та їх розподілів оцінити можливу величину навантаження, яке спричиняє деформацію кристалів.

4. Муарові X -хвильові розподіли інтенсивності суттєво залежать від величини та характеру розподілу локальних ЗН, діючих на поверхню аналізатора LLL -інтерферометра. Встановлено, що розподіли $P_R(v_r)$ проявляють різну чутливість до характеру розподілу ЗН у низько- та високочастотних діапазонах. Запропоновано підхід до аналізу муарових зображень, який дозволяє визначати не тільки сумарну величину діючих ЗН, але й їх просторовий розподіл.

5. Для енергетичних спектрів МЗ значення сумарного навантаження P_{NL} , яка спричиняє їх появу, визначено на основі середніх просторових радіальних частот \bar{v}_R шляхом апроксимації залежності $P_{NL}(\bar{v}_R)$. Відносна похибка обчислення P_{NL} є допустимою як для еталонних муарових зображень ($\epsilon_{PL}=1,7\%$), так і для експериментальних зображень ($\epsilon_{PL}=4,6\%$).

6. Просторовий розподіл діючих ЗН P_{nr} визначено на основі аналізу форми P_R для енергетичних спектрів муарових зображень з урахуванням сумарного навантаження P_{NL} . Форму просторових розподілів P_{nr} функціонально описано синусоїдами, амплітуди яких обчислено на основі нормованих площ розподілів P_R

для двох заданих діапазонів частот. Залежності між розподілом ЗН P_{nr} та параметрами P_R встановлено шляхом аналізу серії еталонних муарових зображень.

Запропонований метод визначення просторового розподілу ЗН P_{nr} може застосовуватися для визначення довільних ЗН та відповідних їм деформацій кристалів, які просторово локалізовані вздовж відрізка прямої і значення яких наближено апроксимуються синусоїдами.

7. За допомогою чисельного розв'язку рівнянь Такагі розраховано муарові зображення на деформаційних полях, що виникають при певному розподілі зосереджених навантажень у вигляді двох окремих рядів, по-різному орієнтованих, і в яких рівномірно розміщені зосереджені навантаження, зокрема: паралельних, перпендикулярних та під кутом до вектору дифракції \vec{H}_{220} . Якісний аналіз формування МЗ на деформаційному полі, яке утворюється двома паралельними рядами із ЗН, паралельними \vec{H}_{220} дає змогу стверджувати наступне:

а) Результируюча муарова картина формується сумарним навантаженням від усіх ЗН у верхньому та нижньому рядах. Збільшення кількості ЗН у рядах, а відповідно і сумарного навантаження як в окремому ряді, так і в двох рядах призводить, як наслідок, до збільшення кількості муарових смуг та зменшення їх періоду.

б) При віддаленні від рядів ЗН формування муарових смуг уже відбувається на результируючому деформаційному полі. Сумарне деформаційне поле у цих областях скомпенсоване накладанням областей розтягу-стиску атомних площин від окремих ЗН.

8. При формуванні МС на деформаційному полі, утвореному двома перпендикулярними рядами ЗН, що перетинаються у центрі вертикального ряду при збільшенні довжини горизонтального ряду і, відповідно, кількості ЗН, зменшується вплив ЗН вертикального ряду і формується замкнута на ЗН горизонтального ряду еліпсоподібна система МС. Як і в випадку паралельних рядів ЗН поблизу двох рядів виникає без муарова область, яка може у залежності від сумарного навантаження (або кількості ЗН у ряді) змінювати контраст білий на темний (і навпаки).

Можна стверджувати, що сформована таким чином система МС, яка хоча і зберігає деякі характерні риси для кожного із вертикальних та горизонтальних рядів, проте у цілому відображає результируюче деформаційне поле утворене ними. Максимальне значення фрактальної спектральної розмірності може свідчити про те, що МЗ вже формується на їх сумарному деформаційному полі.

Список цитованої літератури

- 1*. Bonse U. X-ray interferometr / U.Bonse, M.Hart // Appl. Phys. Letters. – 1965. – Vol. 6, No. 8. – P. 155-156.
- 2*. Zverev D. X-ray phase-sensitive imaging using a bilens interferometer based on refractive optics / D. Zverev, I. Snigireva, V. Kohn, S. Kuznetsov, V. Yunkin, A. Snigirev // Optics Express. – 2020. – Vol. 28. – P. 21856-21868.
- 3*. Becker P. History and progress in the accurate determination of the Avogadro constant // Rep. Prog. Phys. – 2001. – Vol. 64. – P. 1945–2008.
- 4*. Ferroglio L. Si lattice parameter measurement by centimeter X-ray interferometry /

- L. Ferroglio, G. Mana, E. Massa // *Optics express*. – 2008. – Vol. 16. – No. 21. – P. 16877.
- 5*. Раранский Н.Д. Рентгеноинтерферометрическое изображение полей деформаций вокруг дислокационных скоплений / Н.Д. Раранский, В.П. Шафранюк, И.М. Фодчук // *Металлофизика*. – 1985. – Т. 7. – № 5. – С. 63-71.
- 6*. Fodchuk I.M. Moiré images simulation of strains in X-ray interferometry / I.M. Fodchuk, M.D. Raransky // *J. Phys. D: Applied Physics*. – 2003. – Vol. 36. – P. A55-60.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В ПРАЦЯХ

1. Fodchuk I.M. The Features of X-Ray Topographic Contrast Formation in Silicon with Dislocation Clusters. / I.M. Fodchuk, S.N. Novikov, D.G. Fedortsov, A.Ya. Struk, I.V. Yaremchuk // *Crystallography Reports*. – 2013. – Vol. 58, No. 7. – P. 976–983.
2. Новіков С.М. Вплив величини і розташування зосереджених сил на формування муарових картин в *LLL*-інтерферометрі. / С.М. Новіков, І.М. Фодчук, Я.М. Струк, І.В. Яремчук // *Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика. Електроніка*. – 2014. – Т. 3, Вип. 2. – С. 11-19.
3. Fodchuk I.M. Direct and inverse problems in X-ray three-crystal triple Laue case interferometry. / I.M. Fodchuk, S.N. Novikov, I.V. Yaremchuk // *Applied optics*. – 2016. – Vol. 55, No. 12. – P. B120-B125.
4. Фодчук И.М. Воспроизведение остаточного деформационного поля в кристалле-анализаторе *LLL*-интерферометра. / И.М. Фодчук, С.Н. Новиков, И.В. Яремчук // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2016. –Т. 38, № 3. – С. 389-403.
5. Баловсяк С.В. Воспроизведение остаточного деформационного поля в кристалле-анализаторе *LLL*-интерферометра. / С.В. Баловсяк, С.Н. Новиков, И.М. Фодчук, И.В. Яремчук // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2019. – Т. 41, № 3. – С. 389-402.
6. Fodchuk I.M. Reconstruction of spatial distribution of strains in crystals using the energy spectrum of X-ray Moire patterns. / I.M. Fodchuk, S.N. Novikov, S.V. Balovsyak, I.V. Yanchuk, V.F. Romankevych // *Ukr. J. Phys. Opt.* – 2020. – Vol. 21, No. 3. – P. 141-151.
7. Баловсяк С.В. Спосіб визначення величини деформаційних полів кристала на основі X-променевого муарового зображення в кремнієвому *LLL*-інтерферометрі. / С.В. Баловсяк, П.М. Литвин, І.М. Фодчук, І.В. Яремчук // Патент на корисну модель 121378 Україна, МПК G01T 1/16, G06F 17/00, G06F 17/17. Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича (UA). – №u201702011; заяв. 02.03.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. №23/2017.
8. Fodchuk I.M. Simulation of moiré patterns of silicon depending on the nature of arrangement of local concentrated forces in the series / I.M. Fodchuk, S.N. Novikov, I.V. Fesiv, Ya.M. Struk, I.V. Yaremchuk // XIV міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок та наносистем (МКФТТПН-XIV). – 20-25 травня, Івано-Франківськ (Україна), 2013. – P. 122-123.
9. Фодчук И.М. Особенности исследование полей деформаций методом рентгеновской интерферометрии / И.М. Фодчук, С.Н. Новиков, Я.М. Струк, И.В. Фесив, И.В. Яремчук // VI Українська наукова конференція з фізики напівпровідників УНКФН-6. – 30 вересня – 4 жовтня, Чернівці (Україна), 2013. – С. 345-346.

10. Fodchuk I.M. The features of research of deformation fields by *X*-ray interferometry / I.M. Fodchuk, S.N. Novikov, Ya.M. Struk, I.V. Fesiv, I.V. Yaremchuk // The 11th International Conference "Correlation Optics". – 18-21 September, Chernivtsi (Ukraine), 2013.
11. Fodchuk I. Influence of magnitude and arrangement of concentrated forces onto the formation of moiré patterns in *LLL*-interferometer / I. Fodchuk, S. Novikov, Ya. Struk, I. Fesiv, I. Yaremchuk // 12th Biennial Conference on High-Resolution *X*-Ray Diffraction and Imaging XTOP 2014. – 14-19 September, Villard de Lans (France), 2014.
12. Фодчук І.М. Муарові картини модельних мікро подряпин в Si / І.М. Фодчук, С.М. Новіков, І.В. Яремчук // Physical and technological problems of radio engineering devices, telecommunication, nano-and microelectronics. – 23-23 October, Chernivtsi, (Ukraine), 2014. – С. 192.
13. Fodchuk I.M. Reconstruction of Residual Deformation Field from Moiré Patterns in the *X*-ray Interferometry / I.M. Fodchuk, S.N. Novikov, Ya.M. Struk, I.V. Yaremchuk // XV міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок та наносистем (МКФТТПН-XV). – 11-16 травня, Яремча (Україна), 2015.
14. Fodchuk I.M. Reconstruction of nature of elastic fields from moiré patterns in the *X*-ray interferometry / I.M. Fodchuk, S.N. Novikov, I.V. Yaremchuk // The Twelfth International Conference "Correlation Optics 2015". – 14-18 September, Chernivtsi (Ukraine), 2015.
15. Fodchuk I. Long-Range Interaction of Residual Deformation Fields in the *X*-Ray Triple-Crystalline *LLL*-Interferometer / I. Fodchuk, S. Novikov, M. Raransky, V. Shafranuyk, I. Yaremchuk // 13th Biennial Conference on High Resolution *X*-Ray Diffraction and Imaging XTOP 2016. – 4-8 September, Brno (Czech Republic), 2016. – Vol. 23. – No. 3. – P. 302.
16. Новіков С.М. Відтворення можливих джерел залишкових деформацій в рентгєнівському три кристальному *LLL*-інтерферометрі / С.М. Новіков, І.М. Фодчук, М.Д. Раранський, В.П. Шафранюк, Я.М. Струк, І.В. Яремчук // VII українська наукова конференція з фізики напівпровідників "УНКФН-7". – 26-30 вересня, Дніпро (Україна), 2016. – С. 401-402.
17. Balovsyak S. The Fourier energy spectrum for moiré images arising under the action of concentrated forces / S. Balovsyak, I. Fodchuk, S. Novikov, I. Yaremchuk // XVI міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок та наносистем (МКФТТПН-XVI-ICPTTFN). – 15-20 травня, Івано-Франківськ (Україна), 2017. – С. 357.
18. Fodchuk I. Calculation of force distribution based on *X*-ray moire images / I. Fodchuk, S. Balovsyak, S. Novikov, I. Yaremchuk // 14th Biennial Conference on High Resolution *X*-Ray Diffraction and Imaging XTOP 2018. – 3-7 September, Bari (Italy), 2018.
19. Novikov S. Reconstitution of Strain Distribution from *X*-Ray Moiré Images by Characteristics of the Fourier Energy Spectrum / S. Novikov, S. Balovsyak, V. Romankevych, I. Yanchuk // XVII міжнародна фреїківська конференція з фізики і технології тонких плівок та наносистем (МКФТТПН-XVII). – 20-25 травня, Івано-Франківськ (Україна), 2019. – С. 161.
20. Fodchuk I. Residual strain reconstruction from *X*-ray moiré images through the radial distribution of Fourier power spectrum / I. Fodchuk, S. Balovsyak, S. Novikov, I. Yanchuk, V. Romankevych // 14th International Conference on Correlation Optics. – 16-19 September, Chernivtsi (Ukraine), 2019. – P. M 21.

АНОТАЦІЯ

Янчук І.В. Фазоконтрастні X-променеві томографія та інтерферометрія структурних порушень у кристалах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук (доктора філософії) за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, 2021.

Встановлено особливості формування муарових зображень, що виникають у деформаційному полі, утвореному при дії одновимірних рядів локальних зосереджених навантажень на вихідну поверхню аналізатора *LLL*-інтерферометра для випадків їх орієнтації паралельно або перпендикулярно вектору дифракції. Показано, що фазовий муар є своєрідним зондом, за допомогою якого можна оцінити величину деформації окремих зосереджених навантажень зі зміни періодів муарових смуг, а також визначити характер зміни сумарного деформаційного поля.

Встановлено, що між значеннями сумарного навантаження та середньої частоти існує кореляція, яка дає змогу встановити функціональний зв'язок між ними. Запропоновано метод, який дозволяє пов'язати залежність середніх просторових частот енергетичних спектрів муарових зображень та сумарного навантаження.

Розроблено нові підходи до аналізу муарових розподілів інтенсивності на основі методу енергетичного спектру Фур'є. Встановлена різна чутливість до характеру розподілу джерел деформацій у низько- та високочастотних діапазонах радіальних розподілів енергетичних спектрів муарових зображень.

Встановлено, що формування муарових смуг на деформаційному полі, утвореному окремими двома рядами із локальних 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 поблизу локальних зосереджених навантажень у рядах. Спільним є те, що при віддаленні від рядів формуються еліпсоподібні муарових смуг на результуючому деформаційному полі.

Ключові слова: *LLL*-інтерферометр, муарові зображення, зосереджене навантаження, деформаційне поле, частоти радіальних розподілів, енергетичний спектр Фур'є.

АННОТАЦИЯ

Янчук И.В. Фазоконтрастные рентгеновская томография и интерферометрия структурных нарушений в кристаллах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (доктора философии) по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича, Черновцы, 2021.

Установлены особенности формирования муаровых изображений, возникающих в деформационном поле, образованном при воздействии одномерных рядов локальных сосредоточенных нагрузок на исходную поверхность анализатора *LLL*-интерферометра для случаев их ориентации параллельно или перпендикулярно вектору дифракции. Показано, что фазовый муар является своеобразным зондом, с помощью которого можно оценить величину деформации отдельных сосредоточенных нагрузок по изменению периодов муаровых полос, а также определить характер изменения суммарного деформационного поля.

Установлено, что между значениями суммарной нагрузки и средней частоты существует корреляция, которая позволяет установить функциональную связь между ними. Предложен метод, который позволяет связать зависимость средних пространствен-

ных частот энергетических спектров муаровых изображений и суммарной нагрузки.

Разработаны новые подходы к анализу муаровых распределений интенсивности на основе метода энергетического спектра Фурье. Установлена разная чувствительность к характеру распределения источников деформаций в низко- и высокочастотных диапазонах радиальных распределений энергетических спектров муаровых изображений.

Установлено, что формирование муаровых полос на деформационном поле, образованном отдельными двумя рядами из локальных сосредоточенных нагрузок, ориентированных параллельно, перпендикулярно или под углом, имеет общие и отличительные черты. Отличительные особенности заключаются в формировании различных по периоду и форме систем муаровых полос вблизи локальных сосредоточенных нагрузок в рядах. Общим является то, что при удалении от рядов формируются эллипсовидные муаровых полос на результирующем деформационном поле.

Ключевые слова: *LLL*-интерферометр, муаровые изображения, сосредоточенная нагрузка, деформационное поле, частоты радиальных распределений, энергетический спектр Фурье.

ABSTRACT

Yanchuk I.V. Phase-contrast X-ray tomography and interferometry of structural disorders in crystals. – Manuscript.

The Ph.D. thesis for a scientific degree of the candidate of science (Doctor of Philosophy) on physics and mathematics, field 01.04.07 – solid state physics – Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, 2021.

The peculiarities of the formation of moiré images, that occur in the deformation field formed by the action of one-dimensional rows of local concentrated forces on the output surface of the analyzer *LLL*-interferometer for cases of their orientation parallel or perpendicular to the diffraction vector, were established. It is shown that the phase moiré is a kind of probe, which can be used to estimate the magnitude of the deformation of individual concentrated loads according to the change of periods of moiré bands, as well as to determine changes in total deformation field.

It is established that there is a correlation between the values of total load and average frequency, which allows to establish a functional relationship between them. A method, that allows to find the dependence between average spatial frequencies of the energy spectra of moiré images and total load, is proposed.

New approaches to the analysis of moiré intensity distributions, based on the Fourier energy spectrum method, have been developed. Different sensitivity to the nature of deformation sources distribution in low- and high-frequency ranges of the radial distributions of the energy spectra of moiré images has been established.

It is established that in the case of formation of moiré stripes on the deformation field, created by two separate rows of concentrated loads, oriented in parallel, perpendicularly or at an angle, it has common and different features. Different features are in the formation of various in period and shape moiré stripes systems near rows of concentrated loads. The common is that, elliptical moiré stripes are formed on the resulting deformation field at a distance from the rows.

Key words: *LLL*-interferometer, moiré images, concentrated force, deformation field, frequencies of radial distributions, Fourier energy spectrum.