

ПРИКЛАДНІ МОЖЛИВОСТІ Х-ПРОМЕНЕВОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

В даному огляді проведено аналіз основних праць різних наукових шкіл, опублікованих за останні 40 років. Розглянуто наукові і практичні аспекти використання Х-променевої багатокристалльної інтерферометрії, наведені приклади областей її застосування. Інтерферометричні методи дають можливість визначати: показники заломлення різних речовин; фундаментальні фізичні величини, зокрема значення постійної Авогадро; закономірності і механізми формування Х-хвильових муарових зображень деформацій та впливу різноманітних факторів на їх формування. Зазначається, що Х-променева інтерферометрія є ефективним методом дослідження фазової однорідності медичних і біологічних зразків у фазовій томографії.

В даному огляді проведено аналіз основних праць різних наукових шкіл, опублікованих за останні 40 років. Розглянуто наукові і практичні аспекти використання Х-променевої багатокристалльної інтерферометрії, наведені приклади областей її застосування. Інтерферометричні методи дають можливість визначати: показники заломлення різних речовин; фундаментальні фізичні величини, зокрема значення постійної Авогадро; закономірності і механізми формування Х-хвильових муарових зображень деформацій та впливу різноманітних факторів на їх формування. Зазначається, що Х-променева інтерферометрія є ефективним методом дослідження фазової однорідності медичних і біологічних зразків у фазовій томографії.

Розвиток і впровадження методів оптичної інтерферометрії дав поштовх для розробки методів багатокристалльної інтерферометрії в діапазоні Х-хвильового, нейтронного, електронного випромінювань [1-20, 78]. Х-променева інтерферометрія базується на основних законах оптики.

Перші Х-променеві інтерферометри розроблені У. Бонзе і М. Хартом [1-4] показали, що новий метод Х-хвильової топографії має надзвичайно високу чутливість до порушень кристалічної структури, а також до фазової неоднорідності матеріалів.

Розвиток багатокристалльної інтерферометрії в цілому сприяв розвитку новітніх методів дослідження і діагностики внутрішньої будови різних речовин, зокрема: Х-променевої голографії [54, 55], фазоконтрастної топографії, інтерферометричних систем на тонких плівках [80,81,83], Х-хвильової оптичної і тальботівської інтерферометрії [33-37].

Вивчення зовнішніх впливів на досконалі кристали (зосереджене навантаження [67,68], температурні градієнти [69], дія лазерного опромінення, механічні пошкодження [65], епітаксійне нарощування [66], ультразвукова деформація [70] тощо), а також числове моделювання

даних задач [72, 75-77] є вагомим досягненням кафедри фізики твердого тіла Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

Формування груп когерентних пучків Х-променів та їх взаємної суперпозиції є важливим завданням Х-променевої інтерферометрії, що приводить до вивчення особливостей динамічного розсіяння Х-хвиль в пружно деформованих монокристалах, і є важливим підґрунтям для подальшої розробки методик визначення параметрів пружної деформації реальних монокристалів.

1.1. Основні схеми багатокристалльних інтерферометрів

1.1.1. Інтерферометри У. Бонзе і М. Харта

Перші схеми Х-променевих *LLL*-інтерферометрів розроблені Н. Бонзе і М. Хартом [1,2]. Дані системи в основному виготовлялись із монокристалів Si, шляхом здійснення одного або двох прорізів, в результаті чого отримували дві, три плоскопаралельні пластини, розміщені на спільній основі (рис.1). Для даних систем розрізняють два випадки ходу променів, випадок Лауе на проходження і випадок Бреґґа на відбивання [8].

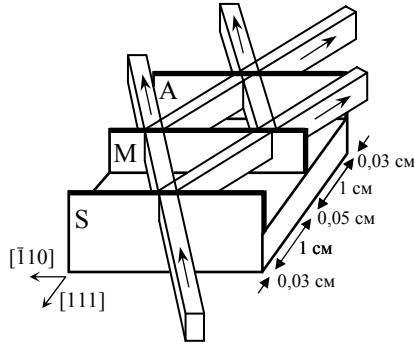


Рис. 1. Форма і розміри трикристалного інтерферометра, виготовленого із монокристалічного блоку кристала кремнію: *S* – розщеплювач, *M* – дзеркало, *A* – аналізатор [1].

При використанні інтерферометричних методів досліджень необхідно мати можливість змінювати умови проведення експерименту. До таких пристроїв належать розбірні інтерферометри, а також інтерферометри із поворотним кристалом-аналізатором [1, 12, 14, 16]. Дані системи складаються із двох кристалічних блоків, які дають змогу змінювати лінійну відстань між пластинами інтерферометра (рис.2).

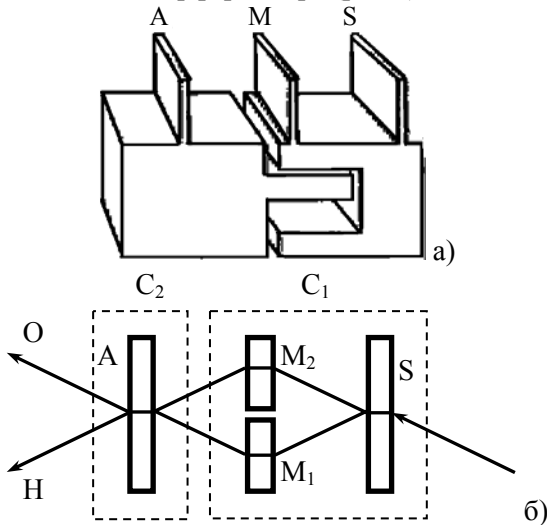


Рис. 2. Зовнішній вигляд: а) розбірного інтерферометра, б) розбірного інтерферометра із роздільним кристалом монохроматором [16].

У роботах [6, 13, 22] розроблена методика прецизійного вимірювання абсолютного значення періоду ґратки досконалого кристалу. При цьому прецизійна чутливість інтерферометра забезпечується механічною та термічною стабільністю. Поворотні муарові картини наведено на рис.3б-д. В даному експерименті використано *LLL*-інтерферометр, наведений на рис.3а. Аналізатор ізольований розрізами від іншої частини інтерферометра так, що єдиною сполучною ланкою є маленька підставка висотою 5 мм і поперечним перерізом $0,2 \text{ мм}^2$ в основі, яка може

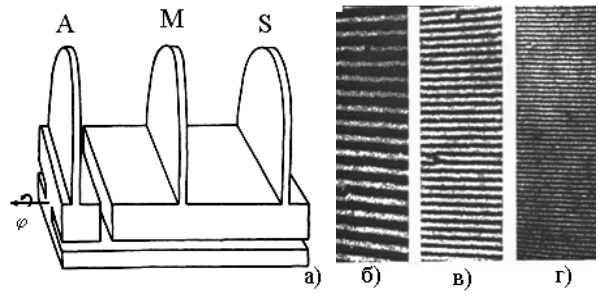


Рис. 3. а) *LLL*-інтерферометр для спостереження муарових смуг. Аналізатор *A* повертається навколо осі φ шляхом пружної деформації малого підтримуючого приводу [6]. Поворотні муарові смуги з кутами нахилу: $\varphi=0,085''$ (б), $0,15''$ (в), $0,25''$ (г).

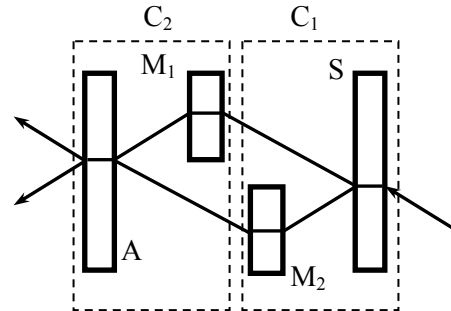


Рис. 4. Схематичне зображення розбірного двокристалічного X-променевого інтерферометра з асиметрично розташованим другим блоком [7, 10].

пружно деформуватись при повороті аналізатора на малий кут φ . Поворот здійснюється в інтервалі від $0,085$ до $0,36$ кутових секунд. Поворотні муарові картини використовуються при визначенні фазового зсуву, який необхідний для визначення величин (фактору) розсіяння [4, 16].

За допомогою інтерферометричних систем із роздільним розташуванням другого кристалу (рис.4) здійснюються прецизійні вимірювання періоду ґратки [7, 10-13]. В даних системах отримують зміну довжини шляху променів внаслідок зміни відстані між частинами другої пластини, а також можна здійснювати незначні повороти у трьох взаємно перпендикулярних площинах.

Для практичного застосування широко використовуються інтерферометри Майкельсона [12, 23], в яких допоміжні кристали виконані у вигляді паралелепіпедальних і клиновидних блоків (рис.5). Такі системи дозволяють визначити показники заломлення досліджуваних зразків клиновидної форми [23].

На рис.6 наведені схеми інтерферометрів, а також геометрія ходу променів [8-14, 21], зокрема: трикристалні інтерферометри Лауе на спільній основі; інтерферометри із роздільними кристалами; із подвійним бреггівським відбиванням, а також комбіновані інтерферометри (Брегг-

Лауе). Дані системи виготовляються із високодо-
скональних кристалів кремнію та кварцу.

Для практичних прецизійних досліджень важ-
ливо розділяти лінії $\text{CuK}_{\alpha 1,2}$ -дублету X-променів
(рис.7) [21]. Це забезпечується наявністю в ін-

терферометричній схемі додаткових блоків змі-
щення, що забезпечують зміну різниці ходу для
даного випромінювання. На рис.7 наведена схе-
ма такого інтерферометра, а також розподіл ін-
тенсивності до і після розділу.

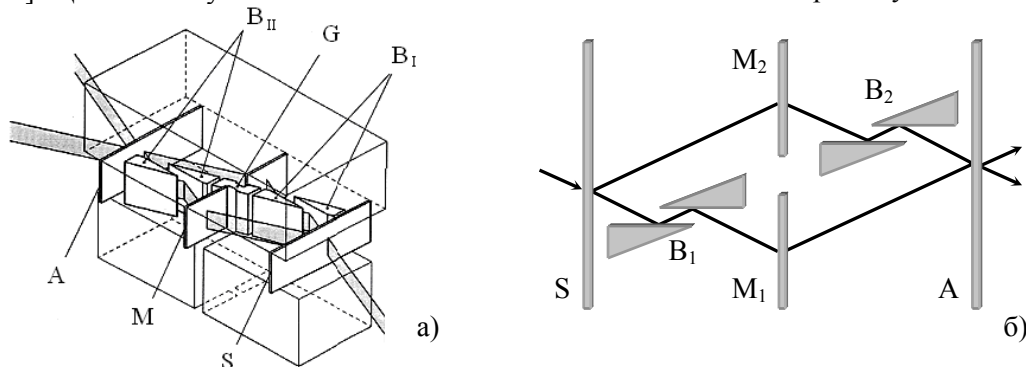


Рис. 5. X-променевої інтерферометр Майкельсона: а) загальний вигляд, б) геометрія ходу X-променів в інтерфе-
рометрі із допоміжними клиновидними блоками [12, 23].

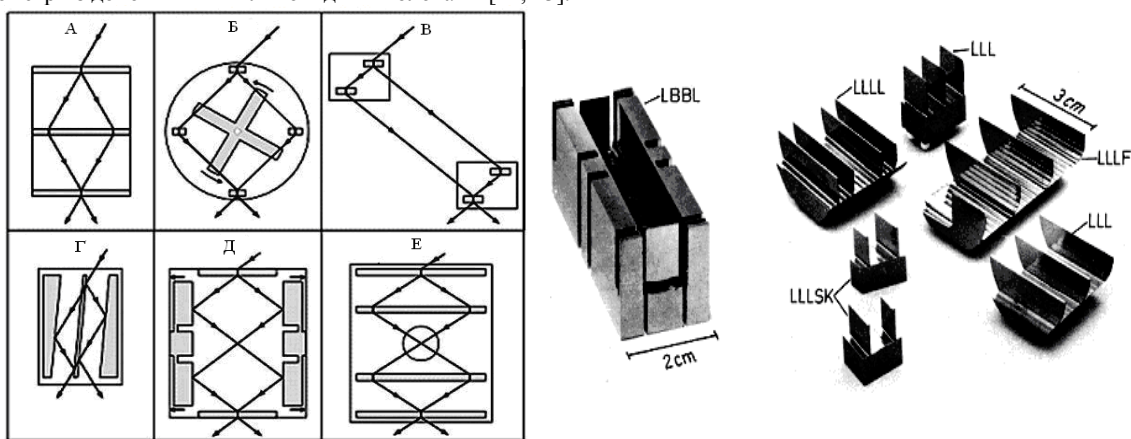


Рис. 6. Схеми різних за призначенням інтерферометрів (ліворуч): а) LLL симетричний; б) такий же, але інша схе-
ма ходу променів; в) асиметричний LLL, виготовлений з двох окремих кристалів; г) LBBL; д) LBBL; е) LLLL
[21]. Праворуч – приклади реальних інтерферометрів [16].

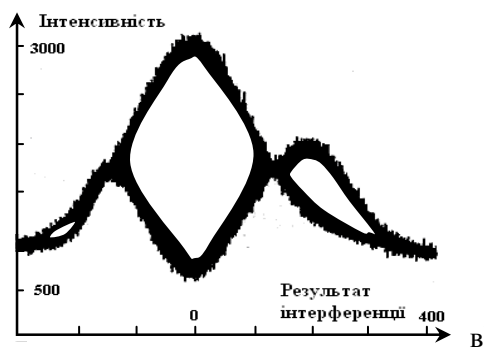
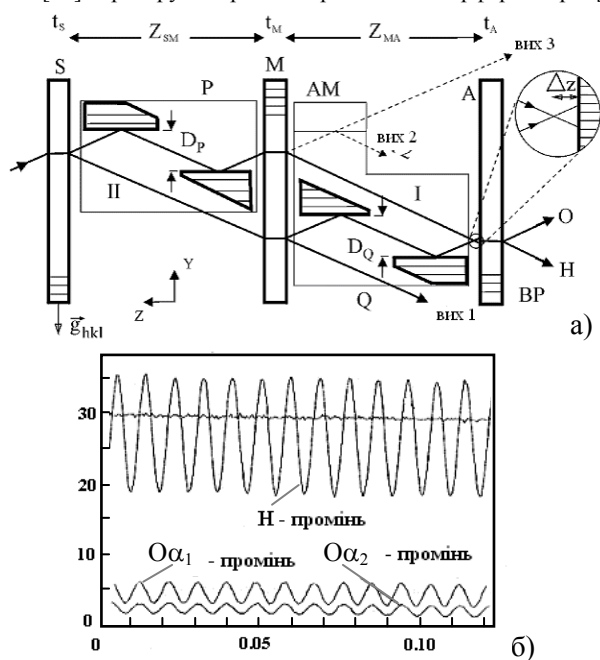
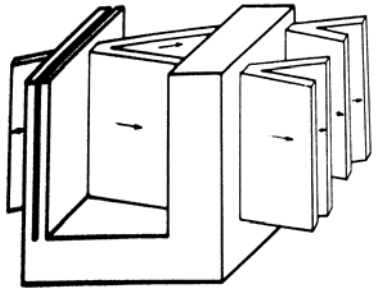


Рис. 7. а) Інтерферометрична система, в якій розді-
ляються лінії $\text{CuK}_{\alpha 1}$ і $\text{CuK}_{\alpha 2}$ [21]; б) розподіл інтен-
сивностей до і після розділення; в) сканований ду-
блет $\text{CuK}_{\alpha 1}$ і $\text{CuK}_{\alpha 2}$ - випромінювання.

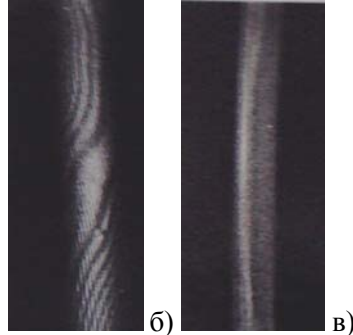
Важливим також є отримання збільшення X-
хвильових дифракційних картин [41,46,47]. Збі-
льшення можна отримати пропустивши промені,
які містять дифракційну інформацію, через
ідеальний товстий кристал в напрямку дифрак-

ції (рис.8). Це сприяє розширенню кутових розмірів дифракційної картини і приводить до збільшення розрізної здатності X-променевого дослідження. Збільшення дифракційного зображен-

ня залежить від товщини блоку і сумарної товщини пластин інтерферометра. На рис.8б,в наведені збільшені муарові картини, отримані з допомогою двокристалльних систем [41, 47].



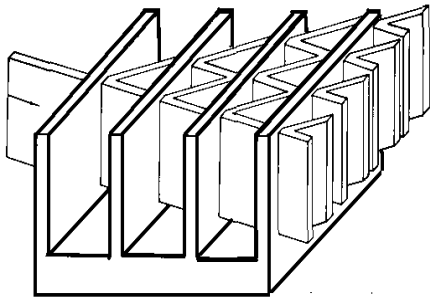
а)



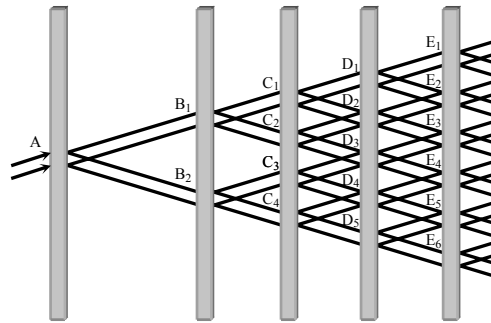
б)

в)

Рис. 8. Двокристалльний X-променевий інтерферометр (а). Отримані муарові картини до (б) і після збільшення (в) [41].



а)



б)

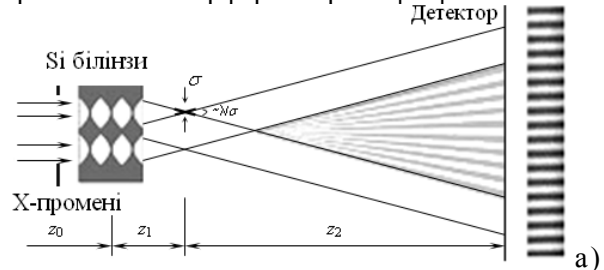
Рис. 9. Схема чотириблочного інтерферометра з рівновіддаленими пластинами (а). Схема інтерференції X-хвиль у п'ятикристалльному інтерферометрі (б) [43, 44].

Для дослідження залежності муарових картин від кількості хвиль, які приймають участь у створенні цих картин, використовувалися чотири- і п'ятикристалльні кремнієві інтерферометри (рис.9) [43,44]. Дана система дозволяє вивчати муарові картини, отримані при накладанні двох або трьох хвильових пакетів. Падаючий промінь, направлений на першу пластину, дифрагує на чотирьох кристалах, розщеплюючись при цьому на 16 хвильових пакетів. Такі дослідження є важливими для однозначного знаходження місцеположення дислокацій за X-хвильовими зображеннями [44].

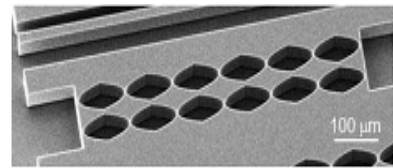
1.2. X-променевий наноінтерферометр на основі Si заломлюючих білінз

У роботі [32] запропоновано новий тип X-променевого інтерферометра із використанням системи білінз, що складаються з двох паралельних, складених заломлюючих лінз, кожна з яких створює дифракційно обмежений пучок при опроміненні когерентним пучком (рис.10). За допомогою даних систем генерується X-хвильове періодичне інтерференційне поле, період якого може змінюватися від десятків нанометрів до десятків мікрометрів, тим самим заповнюється проміж-

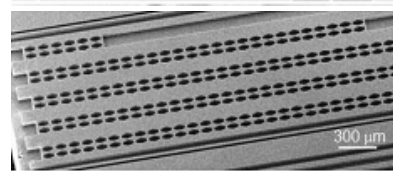
на область використання між кристалічними та ґратковими інтерферометрами [32].



а)



б)



в)

Рис. 10. Схема X-променевого білінзового інтерферометра (а). Скануючий електронний мікроскоп-мікрограф з одиничною кремнієвою білінзою, що складається з 6 окремих параболічних лінз (б). Загальний вигляд системи п'яти білінз, сформованих на одній підкладці (в).

Дане когерентне випромінювання можна використати при створенні нових дифракційних методів формування зображень для дослідження мезоскопічних матеріалів. Когерентне муарове формування зображень (метод радіографії) із використанням білінз має практичне і перспективне використання. Перевага муарової радіографії перед прямими вимірюваннями інтерференційних смуг, створюваними білінзами, полягає в тому, що вона значно знижує вимоги до роздільної здатності детектора, одночасно зберігаючи субмікронну й нанометрову роздільну здатність.

Як і у випадку класичного X-променевого інтерферометра, білінзовий інтерферометр створює два когерентних пучки, які спочатку розділяються у просторі, а потім когерентно рекомбінують для отримання інтерференційної картини. Внаслідок розділення пучків, в один з них легко можна ввести досліджуваний зразок. Будь-яка взаємодія з такими пучками призводить до суттєвих змін в інтерференційній картині, що дає можливість з високою роздільною здатністю

зі зміненої фази нової картини отримувати інформацію про зразок. Білінзовий інтерферометр можна використати для діагностики когерентності випромінювання на існуючих синхротронах. Кремнієві білінзи є стійкими до гранично потужних пучків і відносно низькочутливими до механічних вібрацій.

1.3. Вимірювання показників заломлення

Метод X-променевої *LLL*-інтерферометрії використовується для прецизійного визначення густини досліджуваних біологічних речовин. За його допомогою визначено показники заломлення великої кількості органічних і неорганічних матеріалів [41, 52, 56-58].

Для визначення показників заломлення речовин в діапазоні X-хвиль досліджуваний зразок (тверде тіло або призма з рідиною) розміщують між блоками інтерферометра і визначають зміну періодів муарових картин (рис.11 і рис.12) [41]. У роботі [57] дослідження проводились на зрізах тканин печінки і селезінки білих щурів.

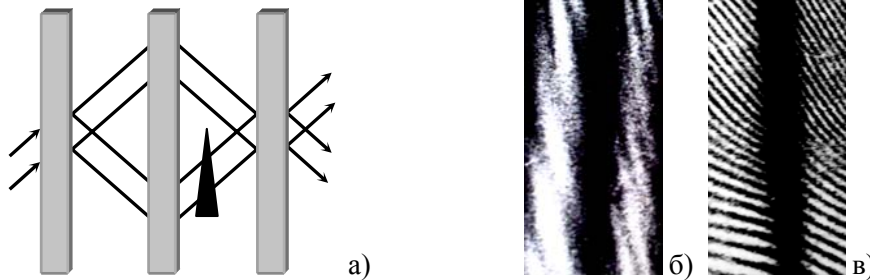


Рис. 11. Схема інтерферометра із клином (а). Муарові зображення для випромінювання MoK_{α} без (б) і з клином (в) [41].

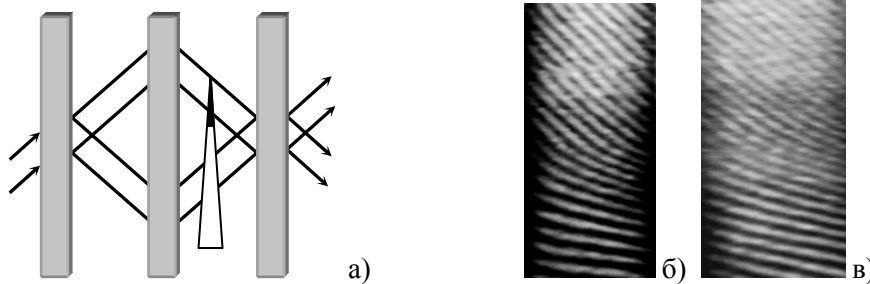


Рис. 12. Схема інтерферометра із призмою (а). Муарові зображення із порожньою (б) і наповненою рідиною трикутною призмою (в) [41].

У роботах [59-61] отримані показники заломлення для Cu, Ni, Ge, і GaAs при $\omega \approx \omega_k$ поблизу *K*-краю поглинання. Виміряні показники заломлення NaCl, KCl, GaF₂ і Si для частот $\omega \gg \omega_k$, визначена функції атомного розсіяння, а також дисперсійні поправки $\Delta f'$ в широкій області довжин хвиль.

Серед робіт Єреванської школи слід відзначити дослідження впливу неоднорідності роз-

поділу густини речовини на інтерференційне X-хвильове зображення за допомогою X-променевого інтерферометра з клином між першим і другим блоком [56, 57]. Об'єктами досліджень були зразки кремнію, пластмаси, ебоніту, графіту, кварцу, паперу. Зазначається, що під час проходження X-хвиль через досліджуваний об'єкт із неоднорідним розподілом густини, відбувається зсув фаз, що приводить до зміни та зник-

нення інтерференційних зображень (рис.13).

Для дослідження однорідності розподілу густини речовини використовується метод маятникових смуг у трикристальному інтерферометрі,

один з блоків якого виготовляється у вигляді тонкого клина (рис.14) [41, 52] Пізніше за допомогою схем наведених на рис.14, отримані інтерферограми різних зразків [58].

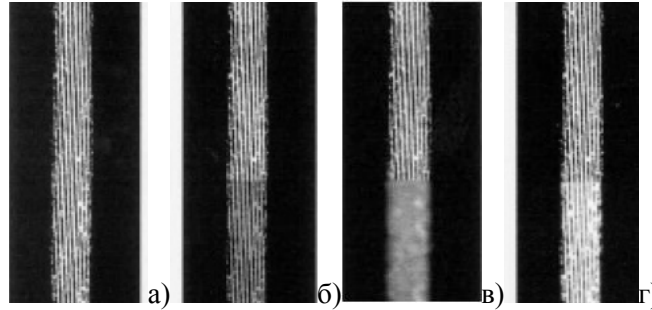


Рис. 13. Шар різної товщини поміщений між блоками інтерферометра [56]: а) повітря, б) зразок із гомогенною густиною, в) зразок із неоднорідною густиною, г) зразок із повільно змінною густиною.

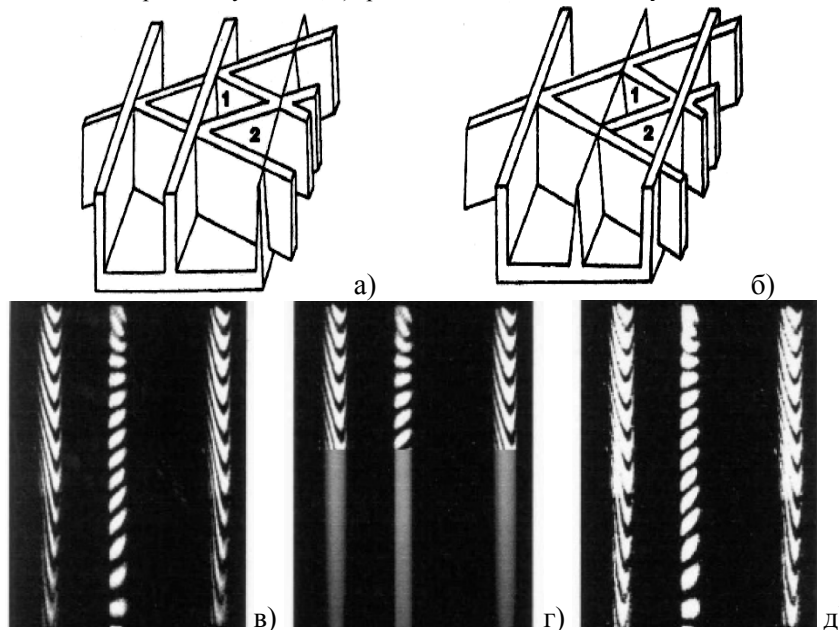


Рис. 14. Трикристальний інтерферометр для дослідження однорідності зразків методом маятникових смуг: а) інтерферометр із останнім блоком у вигляді клина; б) інтерферометр із другим клиновидним блоком [52]. Інтерференційні зображення: в) повітряний шар; г) паперовий зразок; д) кристалічний кремній між блоками [58].

Неоднорідності паперового зразка приводять до зникнення інтерференційного зображення (рис.14г). Для зразка кремнію на рис.14д спостерігається послаблення інтерференційної області – контраст зберігається внаслідок гомогенного розподілу густини. Зазначимо, що за допомогою двоі трикристальних інтерферометрів можна отримати інформацію про розподіл густини майже непрозорих для Х-променів зразків.

Х-променева інтерферометрія знайшла своє застосування і в археології [40]. За її допомогою проводиться попередня неруйнівна візуалізація артефактів у твердих породах. Закам'янілі втілення всередині гірських порід чітко візуалізуються із використанням Х-променевого інтерферометра. Отримано два типи чітких зображень,

один з яких включає фазовий контраст, а інший контраст заломлення (рефракцію) у дифрагованих пучках. Використовуючи стереографічні пари Х-хвильових зображень можна досить точно визначити (з точністю ~0,5 мм) місцеположення включень усередині гірських порід.

1.4. Фазовоконтрастна тальботівська інтерферометрія

Метод Х-променевого фазового контрасту (ФК) – є порівняно новим і використовується для дослідження внутрішньої структури слабопоглинаючих об'єктів (у тому числі медико-біологічних) [33-39]. Основна ідея даного методу полягає в аналізі зображення об'єкта на фотоплівці або координатному детекторі, яке утворюється в результаті зміни фази Х-хвилі після прохо-

дження через досліджуваний об'єкт. Існує два методи отримання ФК- зображень. У першому випадку неоднорідний кутовий розподіл інтенсивності за об'єктом досліджується за допомогою кристала-аналізатора, встановленого в області дифракційного відбивання [33-35, 38]. В основі методу лежить явище заломлення X-променів в об'єкті (дифракційний контраст, фазодисперсійна інтроскопія). Кути заломлення складають лише декілька кутових секунд, однак вони співрозмірні із напівшириною кривої дифракційного відбивання. Саме тому контраст ФК зобра-

жень достатньо високий (до 50-100%). Традиційний абсорбційний метод не ефективний, особливо для м'яких тканин медико-біологічних об'єктів [36]. У другому методі кристал-аналізатор не використовується, а детектор встановлюється на деякій віддалі від досліджуваного об'єкта в ближній області дифракції Френеля [34, 37, 85]. Зображення об'єкта, як і у відомій схемі осової (*in-line*) голографії [85], формується в результаті інтерференції висококогерентного падаючого і розсіяного об'єктом випромінювання.

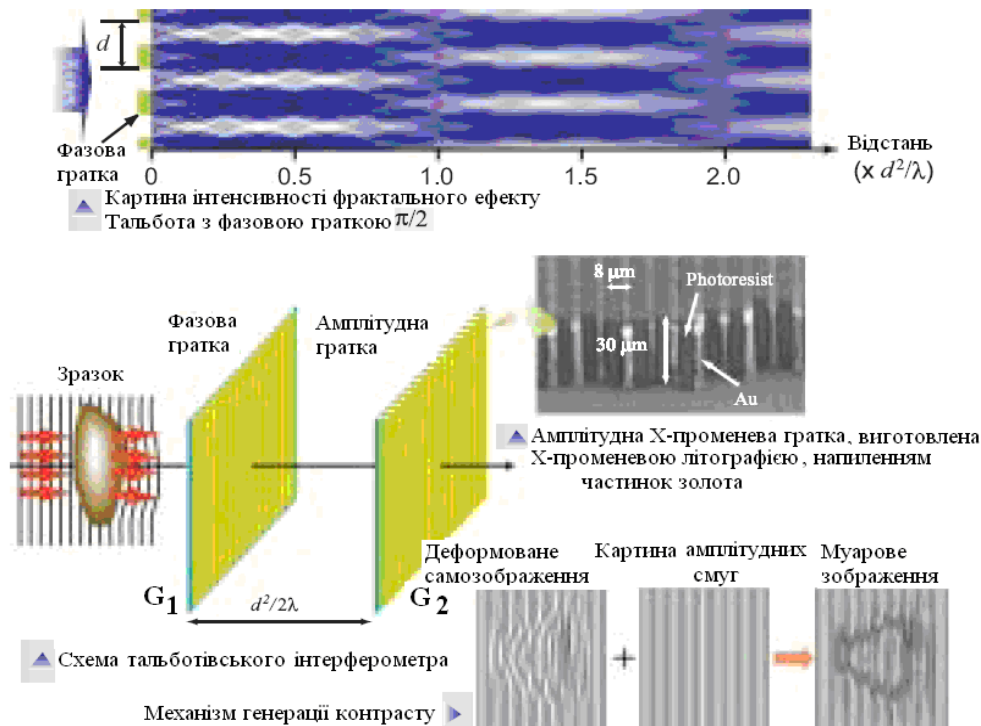


Рис. 15. Схема X-променевого тальботівського інтерферометра. Ґратки G_1 і G_2 , розташовані на відстані, в межах якої спостерігається ефект Тальбота. Інтерференційне контрастне зображення, яке виникає внаслідок набігання фази, після проходження через зразок перед ґраткою G_1 , спостерігається на екрані після ґратки G_2 [33].

У роботах [33-37] за допомогою X-променевого тальботівського інтерферометра реалізовано новий метод X-променевого формування фазових зображень, включаючи фазову томографію. Цей метод є унікальним з огляду на те, що пропускаючі ґратки використовуються для генерування диференціального фазового контрасту (рис.15). Дві ґратки розташовуються на одній осі на певній відстані, яка визначається довжиною X-хвилі λ і періодом ґратки d . Вплив заломлення у зразку, розташованому перед першою ґраткою, спостерігається безпосередньо за другою ґраткою (рис.15).

Детально принцип генерації контрасту описано в [34, 35]. Для реалізації X-променевої тальботівської інтерферометрії є важливим виго-

товлення амплітудної ґратки, яка використовується як друга ґратка. Гранично високочутливе тривимірне формування зображень у X-променевої тальботівській фазовій томографії досягається шляхом кількісного вимірювання диференціального фазового зсуву у зразку.

Приклади практичного використання даного методу наведені на рис.16 і рис.17, на яких з використанням X-хвильового детектора зображена, до прикладу, тканина кролячої печінки, враженої раковою пухлиною (ефективний розмір пікселя $\sim 3,14$ мкм) [34].

Ракове враження тканини виявляється за контрастом, який світліший за контраст від нормальної тканини печінки. Яскраві (світлі) острівці на томограмі вказують на відповідну зміну – відми-

рання тканини (рис.17в). Просторове розділення даного зображення складає 15 мкм. Фазова томограма дає приблизну картину різниці у густині, а границя виявлення змін густини оцінюється на рівні 1,3 мг/см³.

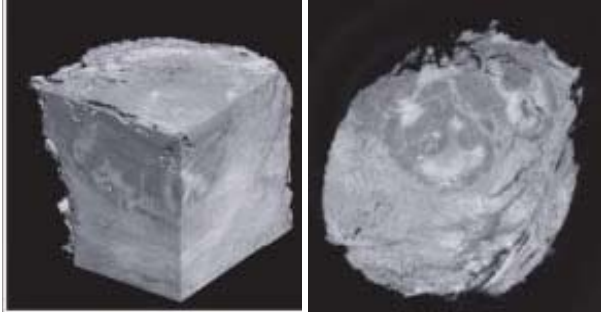


Рис. 16. Фазова томограма тканини кролячої печінки: а) здорова, б) вражена раковою пухлиною [34].

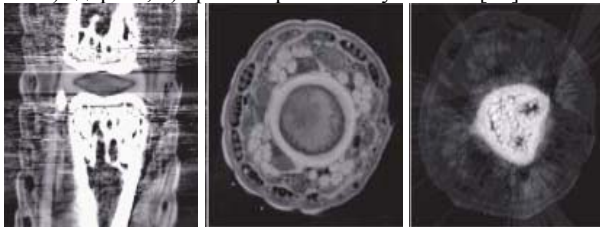


Рис. 17. Фазова томограма мишачого хвоста. Візуалізуються кістки (а) і м'які тканини, такі як шкіра, м'язи, з'єднувальна тканина та хрящовий диск (б, в). Область сірого контрасту на фрагменті (в) у 3,5 рази ширша, ніж на фрагменті (б) [34].

1.5. Сучасні метрологічні досягнення LLL-інтерферометрії

До найбільш значних використань X-променевих інтерферометрів слід віднести реєстрацію явища трансляційного муару [1-13]. Якщо пластину аналізатора рухати у напрямку, вказаному стрілкою на рис.18а, то інтенсивність заломленого (*T*) і відбитого (*R*) пучків змінюється в протифазі з періодом, який дорівнює міжплщинній відстані (рис.18б). Максимумам і мінімумам пучків відповідають і найбільш розорієнтовані положення аналізатора і дзеркала, як показано на схемах рис.18в.

Якщо змінювати відстань між дзеркалом і аналізатором, то величина похибки зберігатиметься постійною, до прикладу, на рис.18в розглянуто випадок, коли відбивні площини дзеркала і аналізатора, перпендикулярні до поверхні пластини. У разі ж дифракції від нахилених площин (рис.18г) при зміні вказаної відстані змінюватиметься і похибка, причому з періодом $C = d_{hkl} / \cos \varphi$, де φ – кут нахилу досліджуваних (*hkl*) площин (1 – дзеркало, 3 – аналізатор, 2 – недифрагуючий прошарок). Використовуючи розглянуті на рис.18 можливості реєстрації трансляційного муару Деслеттес [24] розробив

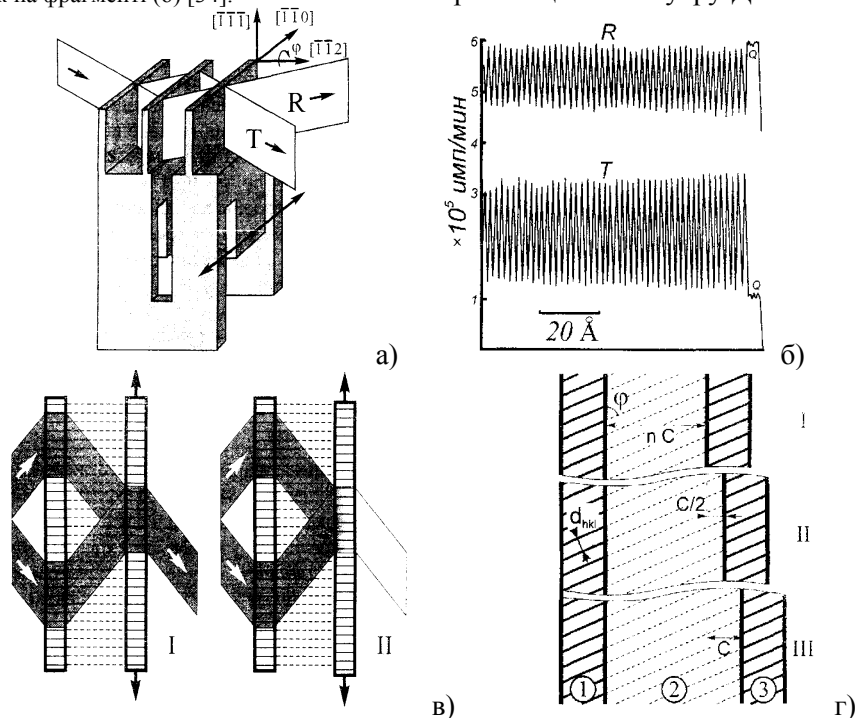


Рис. 18. Реєстрація трансляційного муару за допомогою X-променевого інтерферометра "на проходження"; а) схема інтерферометра; б) осциляції інтенсивності відбитого і заломленого пучків; в) взаємні положення атомних площин аналізатора і дзеркала, що відповідають максимумам і мінімумам інтенсивності X-променів (I - випадок когерентного розташування атомних площин аналізатора і дзеркала, II – випадок їх найбільш розорієнтованого розташування); г) до пояснення впливу відстані між дзеркалом і аналізатором на трансляційний муар при дифракції від нахилених площин [21].

пристрій, що складається з трикристального X-променевого і додаткового оптичного інтерферометрів, змонтованих на загальній основі. Робота такого комбінованого приладу з одночасним записом по оптичному і X-хвильовому каналах дозволила проводити абсолютні визначення лінійних розмірів до 50 мкм з похибкою на рівні одного ангстрема.

1.5.1. Визначення постійної Авогадро і міжплощинної відстані (220) в Si

X-променева інтерферометрія має важливе практичне застосування в метрології [25-31], наприклад для визначення постійної Авогадро. На сьогодні вважається, що існуючий еталон кілограма є артефактом, який треба замінити більш точним базовим атомним стандартом мас. Існує два шляхи оцінки маси. З однієї сторони маса може бути отримана множенням числа атомів у кожній комірці на їх середню масу. З іншої сторони можна використати високодосконалий кристал, в якому молярний об'єм є інваріантним і через об'єм елементарної комірки і мікроскопічну густину розрахувати необхідну масу. Разом з тим, структурна досконалість існуючих матеріалів (в першу чергу Si) ще не відповідає формальному інваріанту відношення коефіцієнта середньої молярної маси до густини (молярний об'єм) і має достатньо суттєві відмінності.

Постійна Авогадро є зв'язком між атомними і макроскопічними шкалами:

$$N_A = \frac{nM}{\rho a_0^3}, \tag{1}$$

де n – кількість атомів комірки, M – відношення молярної $M_{\text{моль}}$ до атомної маси m_a , ρ – густина, a – період ґратки (Si).

Схеми прецизійного вимірювання періоду ґратки кремнію наведені на рис.19 [25]. X-хвилі, дифраговані двома першими кристалами S і M , породжують стаціонарне хвильове поле у третьому кристалі-аналізаторі. Третій кристал A переміщується паралельно вектору дифракції. Додатковий пристрій регулювання довжини рухомої частини кристалічного інтерферометра дозволяє досить точно контролювати такі зміщення. Кількість отриманих інтерференційних смуг на одиницю довжини дає можливість визначити з високою точністю міжплощинну відстань d_{220} (див. табл.1) [25,30].

Як правило, значення постійної Авогадро визначається з густини, відносної атомної маси та лінійних розмірів ґратки. Отримане у 2001 році за допомогою методу трикристальної LLL -інтер-

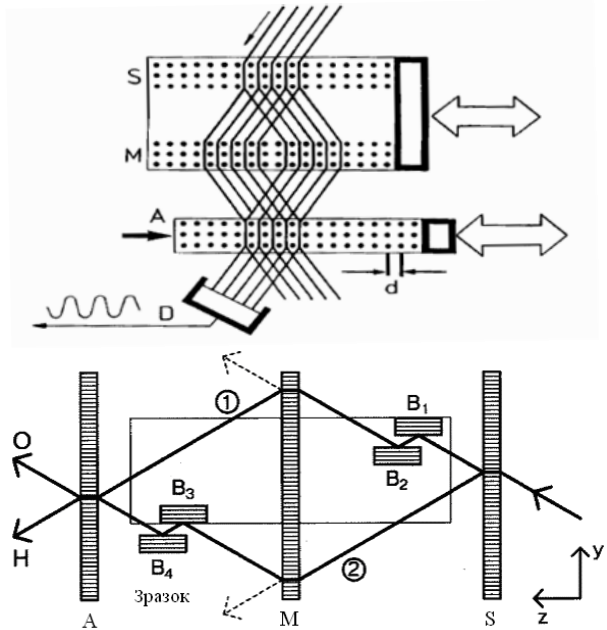


Рис.19. а) Схема трикристального інтерферометра із пересувним кристалом аналізатором [24,25]. б) Схема X-променевого майкельсонівського інтерферометра для визначення ангстремних зміщень ґратки [22].

Таблиця 1. Динаміка зміни точності визначення постійної Авогадро [29]

№	Автор	Рік	Метод	Значення, Å	Похибка Δ, Å
1.	Деслеттес	1974	XRCD	6,0220945	1 · 10 ⁻⁵
2.	Деслеттес	1987	XRCD	6,0221340	1 · 10 ⁻⁶
3.	Коен	1987		6,0221365	6 · 10 ⁻⁶
4.	Безіл	1994	XRCD	6,0221363	4 · 10 ⁻⁶
5.	Де Бівре	1995	XRCD	6,0221379	6 · 10 ⁻⁶
6.	Фаллі	1999	XRCD	6,0221365	3 · 10 ⁻⁷
7.	Де Бівре	2001	XRCD	6,0221335	1 · 10 ⁻⁸

ферометрії значення постійної Авогадро дорівнює: $N_A = 6,0221335(30) \cdot 10^{23}$ моль⁻¹, при цьому середня похибка вимірювання становить $\Delta d \sim 1 \cdot 10^{-8}$ Å [27,29].

Найбільш точно значення міжплощинної відстані визначене у 2008 році в роботі [30]: $d_{220} = 1,92015569$ Å, при $\Delta d = \pm 3 \cdot 10^{-9}$ Å. При цьому одна із пластин інтерферометра зміщується на відстань до п'яти сантиметрів [30].

На рис.20 зображений LLL -інтерферометр, який використовується для фазової модуляції X-випромінювання [30, 31]. Монохроматичні X-хвилі розщеплені першим кристалом на два хвильових пакети. За допомогою другого кристалу відбувається наступне розщеплення і в подальшому синтез полів у кристалі аналізаторі, що приводить до створення інтерференційного зображення. Згідно динамічної теорії розсіяння

X-хвиль в кожній дифрагованій хвилі одного з кристалів інтерферометра проходить зміна фази $2\pi u_{xi}/d$, d – період ґратки, u_{xi} – зміщення (x – координата, орієнтація якої відносно аналізатора, розщеплювача і дзеркала вказана на рис.20.

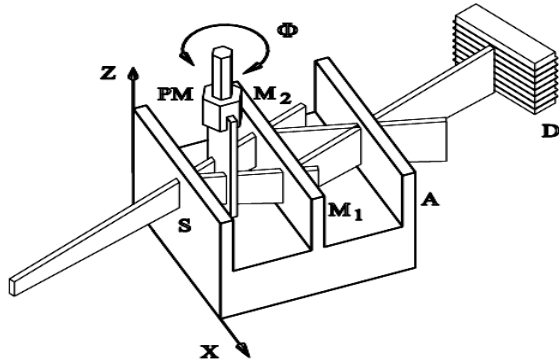


Рис. 20. X-променевий інтерферометр, виготовлений із монокристалу кремнію; S – розщеплювач; M_1 і M_2 – дзеркала; A – аналізатор; PM – фазовий модулятор; D – детектор [30].

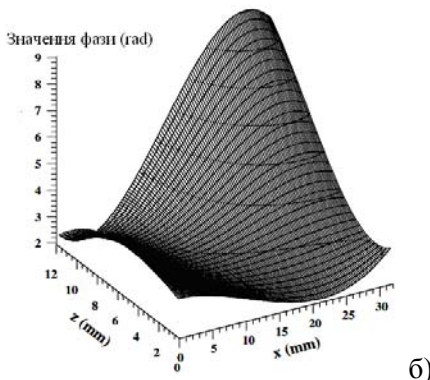
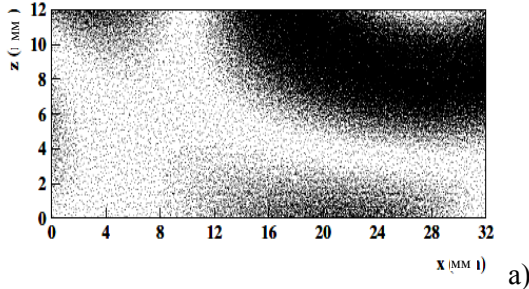


Рис. 21. а) X-хвильова інтерференційна картина кристалу Si, яка містить інформацію про деформацію ґратки, б) поверхня, що характеризує зміну фази [30, 31].

Зміна фази відбувається в процесі поширення хвилі у глибину кристалу вздовж осі Oz. Зміщення u_{xi} є плавномінною функцією, яка описує зміну структури кристалу, і не залежить від товщини пластин інтерферометра. Зміна фази вздовж двох шляхів проходження хвилі в інтерферометрі для координати x і y матиме значення: $2\pi(u_{xA} - u_{xM2})$ і $2\pi(u_{xM1} - u_{xS})$, відповідно. Поява інтерференційних смуг зумовлена накладанням хвиль при проходженні через кристал.

Між пластинами розщеплювача і дзеркала (паралельно до них) розташований модулятор фази (плівка товщиною 500 мкм) з метою об'єднання двох X-хвиль в інтерферометрі.

Фазовий модулятор повертається на кут ϕ , після цього оптична довжина ходу хвиль змінюється, одна частина збільшилася, а інша зменшилася. За рахунок обертання фазового модулятора з інтерференційних смуг зразка можна отримати дані про деформацію ґратки (рис.21) [30, 31].

Схема комбінованого X-променевого і оптичного інтерферометрів представлена на рис.22. Він складається із трьох частин, вирізаних в такий спосіб, що кристалічні площини (220) є ортогональними до пластин інтерферометра. Коли кристал-аналізатор переміщувати в перпендикулярному напрямку до площини (220), спостерігається періодична зміна інтенсивності дифрагованого X-випромінювання. У даному випадку нерухомі і рухомі кристали повинні бути розміщені навпроти один одного. Поворот відбувається за рахунок переміщення аналізатора [24,25].

Аналіз X-хвильового інтерференційного зображення дає змогу визначити відношення $n/m=1648,28$, з якого період інтерференційних смуг визначається з великою точністю, що є достатнім для визначення номера площини ґратки і зміщення аналізатора. Визначення періоду ґратки задається співвідношенням:

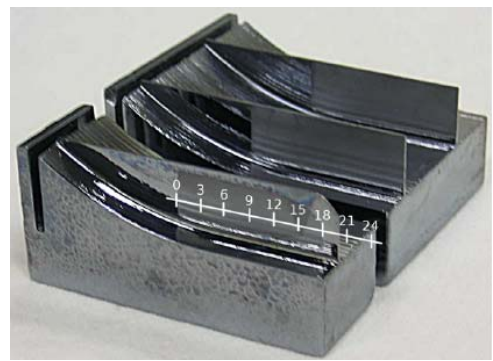
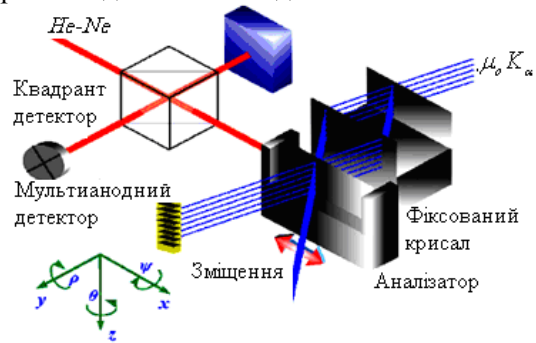


Рис. 22. а) схема поєднання (комбінація) X-променевого і оптичного інтерферометра, б) зовнішній вигляд [24, 25].

$$d_{220} = \frac{m \cdot \lambda_0}{n \cdot 2}, \quad (2)$$

де n і m – кількість інтерференційних смуг оптичного і X-хвильового випромінювань, $\lambda_0/2$ – період оптичної інтерференційної смуги [30].

У роботі [38] із використанням комбінованої оптичної і X-променевої інтерферометрії досліджено вплив поверхневого тиску на міжплощинні віддалі d_{220} кристалу кремнію. Показано, що поверхневий тиск не призводить до суттєвої зміни періодів ґратки зразка в цілому та на його поверхні.

У результаті врахування всіх можливих експериментальних факторів визначено середній період міжатомних площин (220) для кристалу кремнію [31] отриманих у вакуумі при температурі 22,5°C, величина $d_{220}=1,920155508$ (12) Å.

При цьому, для підтвердження кількісних розрахунків у роботі [39] знайдено аналітичні вирази, які дали змогу ізолювати вплив нелінійних поверхневих доданків на вимірювання міжплощинної віддалі d_{220} , що підтверджує точність визначення постійної Авогадро за співвідношенням (1).

1.5.2. Топографія плівкових X-променевої інтерферометрів

Розвиток сучасних електронних і оптичних пристроїв базується, в основному, на використанні багат шарових гетеросистем з товщинами шару, які складають десятки нанометрів. Дослідження привели до створення плівкової X-хвильової інтерферометрії, що є найбільш прецизійним методом визначення форми слабовикривлених атомних площин. Плівкова X-променевої інтерферометрія з'явилась одночасно із об'ємною інтерферометрією. Топограми, які отримані від епітаксійних структур із властивостями плівкового X-променевої інтерферометра, дають можливість виміряти кут нахилу дифрагуючих атомних площин до 0,002 кутових секунд.

Плівковий інтерферометр (рис.23) складається із багат шарової системи типу $A/B/A$, в якій періоди кристалічної ґратки підкладки і верхньої пластини A співпадають [81]. Роздільний шар B при дослідженні інтерференційних явищ в A кристалах не дифрагує X-хвилі. Матеріал роздільного шару може знаходитися як в аморфному, так і кристалічних станах. У останньому випадку необхідно, щоб на кривій ґойдання кутова відстань між максимумом роздільного шару і загальним піком A -шарів була більшою шириною максимуму відбивання.

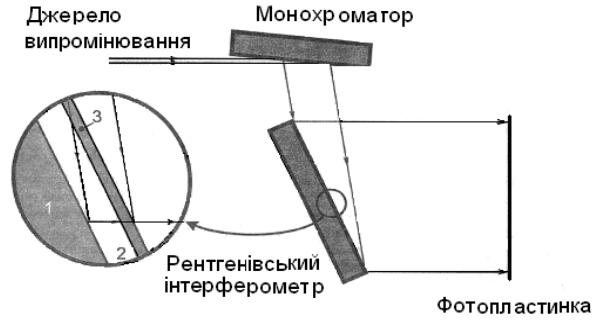


Рис. 23. Схема отримання топограми гетеросистеми із властивостями X-променевої плівкової інтерферометра, 1,2,3 – підкладка, роздільний шар і епітаксійна плівка, відповідно [80].

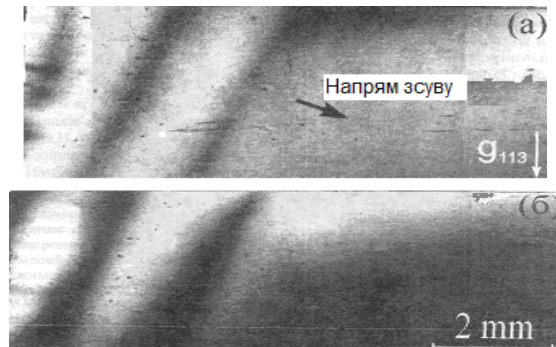


Рис. 24. Зсув X-хвильових інтерференційних смуг на топограмах від гетеросистеми Si/GeSi/Si (001) з клиновидною формою шару GeSi при повороті кристала на 12 кут. сек. [83].

При повороті зразка поблизу кута Брегга на топограмах від гетеросистем Si/GeSi/Si (001) з клиноподібною формою шару GeSi виявлений зсув інтерференційних смуг (рис.24). Товщина роздільного шару змінюється приблизно з постійним градієнтом від нульових величин до 90 нм, внаслідок чого кут клину складає 2,6 кут. сек.

Методом інтерференційної топографії зареєстровано не зафіксований іншими методами вплив технологічних процедур на процес формування шару пористого кремнію (рис.25) [81].

Водночас, існують дві важливі проблеми плівкової X-променевої інтерферометрії. Перша, це – тлумачення контрасту, який спостерігається на топограмах від $A/B/A$ системи, пов'язане із наявністю муару, який виникає при недосконалому одному із кристалів. Інша проблема плівкової інтерферометрії – необхідність розвитку можливостей X-хвильової топографії для вивчення спотворень у гетеросистемах $A/B/A$, коли параметри кристалічної ґратки підкладки і верхньої плівки різняться. Оскільки кремній найбільш досконалий із штучно отриманих об'ємних кристалів, то епітаксійне вирощування на кремнієвій підкладці бездислокаційних шарів з'єднаних з різними параметрами ґраток може розв'язати про-

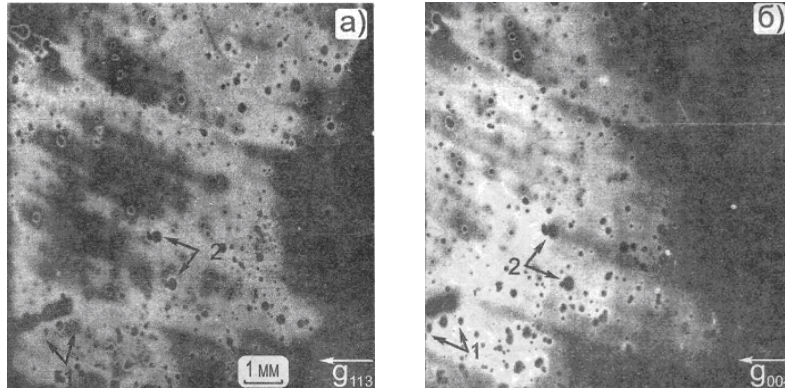


Рис. 25. Топограми від однієї ділянки гетеросистеми Si/пористий Si/ Si(001), отримані в рефlekсах пористого кремнію \bar{g}_{113} (а) і \bar{g}_{004} (б) при використанні (113) Si монохроматора [81] (\bar{g} – вектор дифракції).

проблему отримання високодосконалого підкладкового матеріалу для широкого класу напівпровідників. Для цього необхідно зменшити в них густину дислокацій [82].

1.6. X-хвильова голографія

Реалізація X-хвильової короткохвильової голографії має важливе значення для розвитку мікроскопії, а також для опису внутрішньої мікроструктури оптично непрозорих речовин [54, 55, 84, 85]. Реалізації даної ідеї перешкоджала відсутність потужних джерел когерентного X-

випромінювання. Дана проблема вирішувалася завдяки створенню X-променевих кристалічних монохроматорів, як потужних джерел когерентного X-випромінювання для використання у короткохвильовій голографії. Співставивши задачу запису X-хвильових інтерференційних картин із задачею запису голограм, можна побачити, що за певних обставин муарові картини можна розглядати, як голограми і здійснювати встановлення предметного зображення по аналогії до видимого світла.

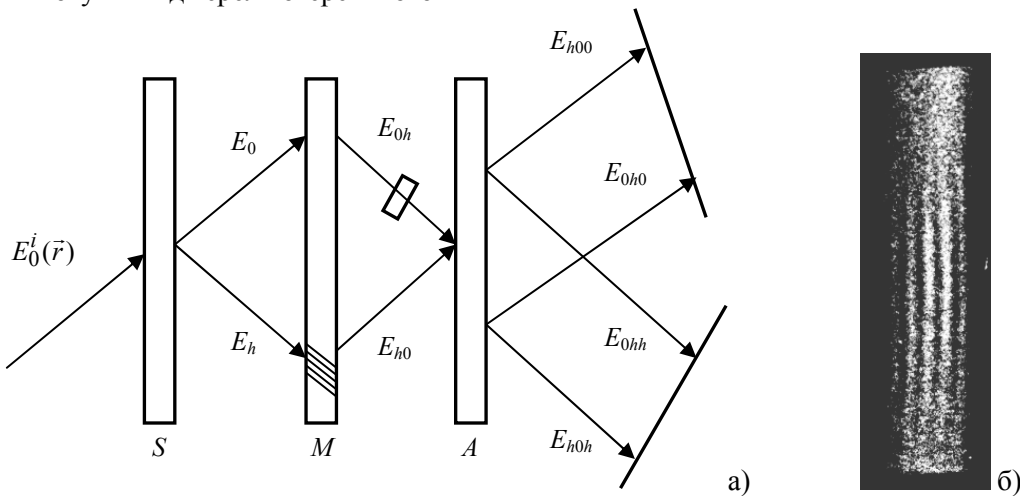


Рис. 26. Інтерферометрична схема запису X-променевих короткохвильових голограм (а); б) інтерференційна картина – голограма трикристалного інтерферометра з ідеальною геометрією [54].

На рис.26б наведена інтерференційні картини, отримана від інтерферометрів з ідеальною геометрією, які зображають рівновіддалені смуги, отримані при суперпозиції двох плоских квазімонохроматичних хвиль. Отримані інтерференційні картини є найпростішими X-променевими голограми. Кут відхилення між прямою і заломленою хвилями – малий, а відстані між смугами набагато більші, ніж довжина хвилі видимого світла. Тому із такої картини важко встановити предметне зображення. Дана про-

блема розв'язується при використанні додаткових оптичних пристроїв, що забезпечують збільшення кута відхилення [54].

1.7. Муарові зображення дії зовнішніх чинників на пластини LLL- інтерферометра

Метод X-хвильового дифракційного муару знайшов широке застосування для визначення планарного розподілу деформації у кристалі, причому чутливість його збільшується із зменшенням деформації. Інтервал відносних деформацій знаходиться в межах від 10^{-4} до 10^{-8} .

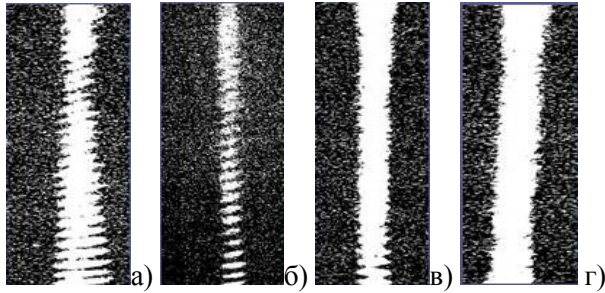


Рис. 27. Муарові картини; а) без поля, б) 750, в) 1250, г) 1500 Гс [53].

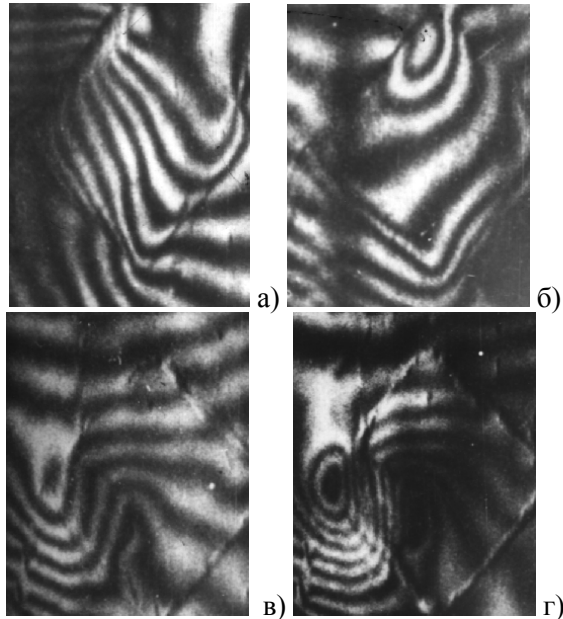


Рис. 28. Вирощена гетероепітаксійна система Ge–Si через: а)–г) 1; 2; 10; 40 днів після напилення [66].

Дослідження впливу різноманітних факторів на формування муарових зображень проведено у працях [41-78].

У роботі [53] експериментально встановлено характер впливу постійних електричних і магнітних полів на формування муарових картин у кремнієвому *LLL*-інтерферометрі. Електричне поле змінює період і напрям муарових смуг. При значних значеннях напруженості електричних полів муарові картини взагалі зникають. На рис.27 наведені інтерференційні картини впливу різних значень магнітного поля на муарові картини.

У високодосконалих монокристалах Si і Ge в процесі вирощування часто виникають скупчення вакансій, або домішкових атомів з кільцевим, зональним або рівномірним розподілом по об'єму кристалу. У роботі [65] для монокристалів Si, які містять смуги росту, з допомогою трикристального інтерферометра проведено аналіз змін періодів ґраток в області смуг росту. Шляхом підбору різних моделей смуг росту вдалося отри-

мати задовільну відповідність розрахованих зображень із експериментальними. Отримана кількісна оцінка величини деформації і напруги на межі смуга росту– досконалий кристал.

У роботі [62] визначено енергію дефекту пакування зі зміщень муарових смуг, які виникають в кристалах кремнію після дії на нього зосередженої сили (мікросекундний удар лазерного променя або укол індентором).

У роботі [67, 68] дією зовнішньої зосередженої сили на клиновидний аналізатор інтерферометра створювалися як слабо, так і сильно деформовані області. Поступова зміна величини прикладеної сили дозволила керувати розмірами областей різного ступеня деформації і дає можливість проводити більш повний аналіз динаміки формування дифракційного контрасту в слабо і сильно деформованих областях кристалу.

У роботах [64, 69] поле деформації в першій пластині інтерферометра створювалося нанесенням з допомогою алмазного індентора подряпини. Дією зосередженої сили на клиновидний аналізатор інтерферометра моделювалися протяжні поля деформацій. Моделювання різних варіантів взаємного розташування і співвідношення потужностей джерел деформації проводилося вибором точки прикладання сил і зміною величини навантаження.

Як показали дослідження, проведені в роботі [66], на початкових стадіях росту епітаксійної системи Si–Si з'єднання плівки і підкладки відбувається ізоморфно. У даному випадку спостерігаються тільки незначні пружні деформації на границі плівка–підкладка, тобто на межі розділу періоди муарових картин практично не змінюються (рис.28).

Для гетероепітаксійних систем Ge–Si різниця міжплощинних відстаней становить 0,226928 Å. Відповідно компенсація невідповідності реалізується наявністю пружних деформацій, а також виникненням дислокацій невідповідності. Пружну деформацію ґраток можна виявити за зміною періодів муарових смуг поблизу границь розподілу. Утворення дислокацій фіксується звичайним муаровим зображенням у вигляді додаткових кілець або муарових смуг [69, 72].

Метод дифракційного муару також був використаний для дослідження просторового розподілу деформації при однорідному термопружному викривленні атомних площин [68, 69]. Температурний градієнт створювався в кристалі-аналізаторі за допомогою термоелемента, розміщеного на відстані 0,5 мм від [69].

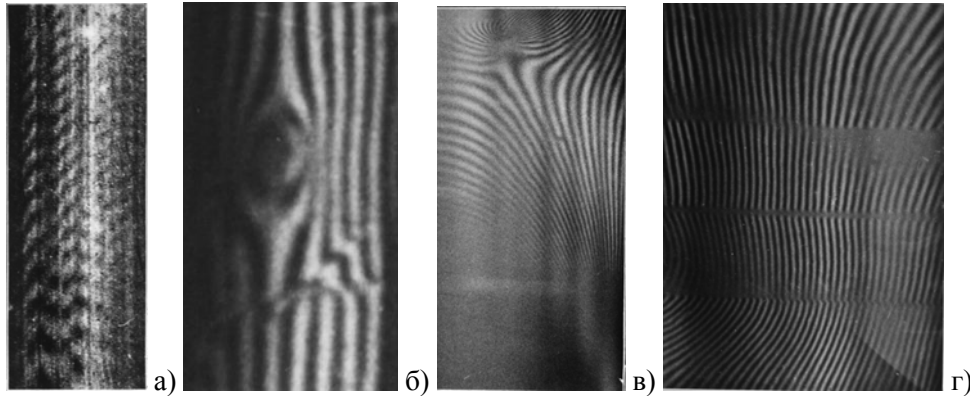


Рис. 29. Муарове зображення: а) смуг росту, відбивання (400) [65]; б) дефекту упаковки [62]; в) дислокаційного скупчення, відбивання (220) [64]; г) двійникової границі для кристалу Si [69].

У роботі [70] досліджено вплив ультразвукової поперечної стоячої хвилі, збудженої за допомогою п'єзоелементів в аналізаторі трикристального інтерферометра, на зміну муарових картин. Встановлено, що найбільша зміна періодів муарових смуг відбувається при частотах ультразвуку, близьких до частот Х-променево акустичного резонансу ($\lambda_s \approx \Lambda$, де λ_s – довжина акустичної хвилі, Λ – екстинкційна довжина). В залежності від амплітуди ультразвукової хвилі можливе як збільшення, так і зменшення кута повороту атомних площин відносно початкового значення. Метод Х-хвильового муару дозволяє визначити не тільки ступінь однорідності акустичного хвильового поля, але й дати оцінку локальному значенню його амплітуди в кожній точці кристалу.

У роботі [64, 69] на поверхні аналізатора інтерферометра наносилася подряпина алмазним інденитором в певних кристалографічних напрямках. На муарових картинах спостерігається дві системи еліпсоїдальних смуг, розділених у центрі подряпини. Протяжність подряпин становила 1 мм, навантаження на інденитор 0,2 Н. Аналіз муарових картин через певні часові інтервали показує, що навіть при кімнатній температурі відбувається релаксація напруг.

У роботах [75-77] наведені теоретичні основи розрахунку муарових картин з використанням рівнянь Такагі [86]. Розроблено алгоритм моделювання Х-хвильових інтерферограм, який полягає у визначенні комплексних амплітуд заломленої і дифрагрованої хвилі у кожній точці кристала і різниці фаз між ними.

У [76] наведені приклади розрахованих муарових картин для різних випадків дії зосередженої сили на аналізатор інтерферометра.

Зазначимо, що теоретичні основи і результати моделювання муарових розподілів інтенсив-

ності дозволять в повній мірі відтворити характер розподілу деформаційних полів в реальних кристалах, що може бути використано і для розв'язку обернених задач Х-хвильової дифрактометрії.

Висновки

1. Х-хвильові інтерферометричні методи дослідження мають великий арсенал можливостей дослідження кристалічних структур. Дані методи дозволяють встановити основні структурні характеристики кристалічних, аморфних і біологічних об'єктів. Розвитку даних методик сприяло конструювання, виготовлення і апробація різних інтерферометричних 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.

2. Вагомим досягненням є встановлення точного значення постійної Авогадро, здійснення стандартизації довжин хвиль за різних експериментальних умов, відтворення закономірностей і механізмів формування Х-хвильових муарових зображень. Для сучасних досліджень важливим є отримання розділення дуплету $K_{\alpha 1}$ і $K_{\alpha 2}$ Х-випромінювання.

3. Експерименти із використанням модуляції фази привели до удосконалення і розвитку методу Х-променевої фазоконтрастної топографії, що дало можливість проводити числові розрахунки для вивчення дефектів і напруг кристалічної ґратки, метрологічних досліджень біологічних зразків, де важливим є отримати зображення м'яких тканин товщиною в декілька десятків мікро-

метрів. У новітніх методах дослідження точність діагностики структури становить $\Delta d \sim 3 \cdot 10^{-9}$ Å.

4. X-променева інтерферометрія знайшла своє застосування у археології. З її допомогою проводиться попередня неруйнівна оцінка досліджуваних областей викопів у твердих породах.

5. Розвиток сучасних електронних і оптичних пристроїв в основному базується на використанні багатошарових гетеросистем, з товщинами шару в десятки нанометрів. Такі дослідження привели до створення плівкової X-променевої інтерферометрії, що є найбільш прецизійним методом дослідження форм слабдеформованих областей.

6. Реалізація X-променевої короткохвильової голографії є важливою для розвитку мікроскопії, а також для опису внутрішньої мікроструктури оптично непрозорих речовин. Це допомогло у створенні X-променевих кристалічних монохроматорів, як потужних джерел когерентних X-хвиль.

7. За допомогою X-хвильового тальботівського інтерферометра отримано новий метод X-хвильового формування фазових зображень. В даному методі використовуються еталонні ґратки з метою генерування дифракційного фазового контрасту.

8. Метод дифракційного муару використовується для дослідження просторового розподілу деформацій, характеристик як окремих дислокацій, так і їх скупчень, напруг і полів зміщень. Даний метод має широке використання для визначення планарного розподілу деформації у кристалі, точність його збільшується із зменшенням деформації (інтервал визначення відносних деформацій становить від 10^{-4} до 10^{-8}).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Bonse U.* X-Ray and neutron interferometry // www.physik.uni-dortmund.de.
2. *Bonse U., Hart M.* X-Ray interferometry // *Appl. Phys. Letters.* - 1965. - **6**, №8. - P. 155-156.
3. *Bonse U., Hart M.* An X-Ray interferometer with long separated interfering beam paths // *Appl. Phys. Letters.* - 1965. - №7. - P. 99-100.
4. *Bonse U., Hart M.* Moire patterns of atomic planes obtained by X-Ray interferometry // *Z. Physik.* - 1966. - **190**. - P.455-467.
5. *Hart M.* Pendellosung fringes in elastically deformed silicon // *Z. Physik.* - 1966. - **189**. - P. 269-291.
6. *Bonse U.* X-Ray diffraction by a crystal containing a translation fault // *Phys. Stat. Sol.* - 1969. - **33**, №1. - P.144-153.
7. *Bonse U.* A two-crystal X-Ray interferometer // *Z. Physik.* - 1968. - **214**. - S.16-21.
8. *Bonse U., Hart M.* Combined Laue-Bragg-case X-Ray interferometers // *Acta Cryst A.* - 1968. - **24**. - P. 240-245.
9. *Bonse U., Bauspiess W.* Measurements of neutron interference and polarization effects caused by nuclear and magnetic interaction // *Phys. Letters.* - 1976. - **56A**, №4. - P.244-246.
10. *Bonse U., Kaat E.* The defocused X-Ray interferometry // *Z. Physik.* - 1971. - **243**. - P. 14-45.
11. *Hart M.* A complete determination of dislocation Burgers vectors by X-Ray interferometry // *Phil. Mag.* - 1972. - **26**, №4. - P.821-831.
12. *Bonse U., Becker P.* The skew-symmetric two-crystal X-Ray interferometer // *J. Appl. Cryst.* - 1974. - **7**. - P. 593-598.
13. *Bonse U., Graeff W., Materlik G.* X-Ray interferometry and lattice parameter investigation // *Revue De Physique Appliquee.* - 1976. - **11**. - P.83.
14. *Badurek G., Rauch H., Zeilinger A. et al.* Phase-shift and spin-rotation phenomena in neutron interferometry // *Phys. Rev.* - 1976. - **14**, №5. - P.1177-1181.
15. *Bonse U.* X-Ray investigation of lattice deformations in silicon induced through high-energy ion implantation // *Phys. Stat. Sol.* - 1969. - **33**, №1. - P.136-142.
16. *Bonse U., Graef W.* X-Ray and neutron interferometry // *X-Ray optics: application for solid.* - Berlin, Heidenberg, New-York: Springer Verlag. - 1978. - P. 2367-2375.
17. *Bonse U., Wroblewski T.* Dynamical diffraction effects in non-inertial neutron interferometry // *Phys. Rev.* - 1984. - **30**, №6. - P.1214-1217.
18. *Bonse U., Wroblewski T.* Novel measuring strategies in neutron interferometry // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* - 1985. - **A235**. - P.557-560.
19. *Hasegawa Y., Loidl R., Baron M. et al.* Off-diagonal geometric phase in a neutron interferometer experiment // *Phys. Rev.* - 2001. - **87**, №7. - P.1-18.
20. *Kischko U., Bonse U.* Neutron interferometry: anti-phasing effects caused by geometrical aberrations // *J. Appl. Cryst.* - 1985. - **18**. - P.326-333.
21. *Bonse U., Uebbing H., Bartcher M. et al.* X-Ray and neutron interferometry, and the measurement of fundamental constants // *J. Metrolog.* - 1994. - **31**. - P.195-201.
22. *Bartscher M., Bonse U.* X-Ray-interferometric determination of Å-scale lattice shifts at the surface of silicon crystals - the analogue to light-optical interference microscopy // *Cryst. Res. Technol.* - 1988. - **33**. - P. 535-541.
23. *Appel A., Bonse U.* Michelson interferometer for X Rays and thermal neutrons // *Phys.Rev. Letters.* - 1991. - **67**, № 13. - P. 1673-1676.
24. *Deslattes R.D.* Optical and X-Ray interferometry of silicon lattice spacing // *Appl. Phys. Lett.* - 1969. - **15**. - P. 386-388.
25. *Deslattes R.D., Henins A., Bowman H. et al.* Deter-

- mination of the Avogadro constant // *Phys. Rev. Lett.* - 1974. - **33**. - P.463-466.
26. *Cristiansen G., Gerward L., Lindegaard A.* A Study of the strain field of gravnin dislocations in a silicon X-Ray interferometr // *J. Appl. Cryst.* - 1971. - **4**. - P.370-375.
27. *Bonse U., Busch F.* X-ray computed microtomography using synchrotron radiation // *Prog. Biophys. Mol. Biol.* - 1996. - **65**, №1-2. - P.133-169.
28. *Becker P., Seyfried P., Siegert H.* The lattice parameter of lightly pure silicon single crystals // *Z. Physik.* - 1982. - **48**, №1. - S.17-21.
29. *Becker P.* History and progress in the accurate determination of the Avogadro constant // *Rep. Prog. Phys.* - 2001. - **64**. - P.1945-2008.
30. *Ferroglio L., Mana G., Massa E.* Si lattice parameter measurement by centimetre X-Ray interferometry // *Optics express.* - 2008. - **16**, № 21. - P.16877.
31. *Massa E., Mana G., Kuetsgens U.* Comparison of the INRIM and PTB lattice-spacing standards // *J. Metrologia.* - 2009. - **7**. - P.249-253.
32. *Snigirev A., Snigireva I., Kohn V. et all* X-Ray nanointerfeometr based on Si refractive bilenses // *Phys. Rev. Letter.* - 2009. - **103**, № 9. - P. 064801(1-4).
33. *Momose A., Kawamoto S., Koyama I. et all* Demonstration of X-Ray Talbot interferometry // *Jpn. J. Appl. Phys.* - 2003. - **42**. - P. 866-868.
34. *Momose A., Takeda T., Itai Y.* Phase-contrast X-Ray computed tomography for observing biological specimens and organic materials // *Jpn. J. Appl. Phys.* - 2003. - **11**, - №11. - P. 2303-2314.
35. *Momose A., Kawamoto S., Koyama I. et all* Phase imaging with X-Ray Talbot interferometer using gratings fabricated with LIGA process // *Jpn. J. Appl. Phys.* - 2003. - **42**. - P. 3221.
36. *Momose A.* Phase tomography by X-Ray Talbot interferometry // *J. Appl. Phys.* - 2005. - **44**. - P. 6355.
37. *Ingal V.N., Beliaevskaya E.A.* X-Ray plane-wave topography observation of the phase contrast from a non-crystalline object // *J. Phys.* - 1995. - **28**. - P.2314-2317.
38. *Materlik G., Frahm A., Bedzyk M.* X-Ray interferometric solution of the surface registration problem // *Physical Rev. Letter.* - 1984. - **52**, №6. - P. 441-444.
39. *Chikawa J., Asaeda Y., Fujimoto I.* New X-Ray topographic technique for determination of small defects in highs perfect crystals // *Journal of Applied Physics.* - 1970. - **41**, №5. - P.1922-1925.
40. *Ando M., Chen J., Hyado K. et all* Non-destructive visual search for fossils in rock using X-Ray interferometry imaging // *Jpn. J. Appl. Phys.* - 2000. - **39**. - P.1009-1011.
41. Безирганян П.А., Дремян Г.Р., Труни К.Г. Исследование рентгеновских дифракционных муаровых картин при суперпозиции боле двух волн // (Препринт) Ереван: Ереванский государственный университет, 1971. - №18. - 21 с.
42. *Безирганян П.А., Эйрамджян Ф.О.* К вопросу о зависимости муаровых картин от длины волны // *Изв. АН Арм.ССР, Физика.* - 1972. - **7**. - С.215-220.
43. *Эйрамджян Ф., Труни К., Безирганян П.* Интерферометр с четырьмя широкими блоками // *Изв. АН Арм. ССР, Физика.* - 1973. - **8**. - С.193-196.
44. *Besirganyan P.A., Eiramshyan F.O., Truni K.G.* Ein Vier-Block-Vielfachinterferometer // *Phys. Stat. Sol.* - 1973. - **20**. - P.611-618.
45. *Безирганян П.А., Асланян В.Г.* Возникновение рентгеновских муаровых картин при асимметричных отражениях в двухблочных интерферометрах // *Кристаллография.* - 1984. - **29**, Вып.5. - С.874-881.
46. *Безирганян П.А., Асланян В.Г.* Возникновение и наблюдение муарового распределения рентгеновских волн в двухкристалльных интерферометрах // *Кристаллография.* - 1984. - **29**, Вып.5. - С.882-887.
47. *Аветисян Г.Г., Арутюнян В.С., Безирганян С.Е.* Особенности рентгеновских муаровых картин, возникающих из-за разности межплоскостных расстояний в двухкристалльных интерферометрах // *Межвузовский сборник научных трудов, Физика, ЕГУ.* - 1985. - Вип.4. - С.42-54.
48. *Безирганян П.А., Безирганян С.Е.* К вопросу зависимости периодов рентгеновских муаровых картин от длины волны // III Всесоюзное совещание "Когерентное взаимодействие излучения с веществом", Ужгород. - 1985. - С.43.
49. *Bezirganyan A.P., Bezirganyan S.E.* The energy distribution in the two-mode X-radiation field inside perfect crystals // *Crystal Res. Technol.* - 1985. - **20**, №1. - P.53-60.
50. *Bezirganyan P.A.* Interpretation of interference patterns obtained from X-Ray Laue interferometers in primary plane waves // *Crystal Res. Technol.* - 1985. - **20**, №2. - P.66-68.
51. *Арутюнян В.С.* Дифракция сферических рентгеновских волн в двухкристалльном интерферометре // *Ученые записи ЕГУ.* - 1986. - **161**, № 1. - С. 59-64.
52. *Безирганян П.А., Арутюнян В.С.* Интерференционные эффекты возникающие в трехкристалльном рентгеновском интерферометре с клиновидным зором // *Межвузовский. сборник научных трудов. Физика.* - 1987. - Вып.8-9. - С.78-80.
53. *Аришакян З.З., Абоян А.О., Безирганян П.А.* Структурные искажения, возникающие в полупроводниковых кристаллах под действием постоянных электрических и магнитных полей // *Межвузовский. сборник научных трудов. Физика.* - 1987. - Вып.8-9. - С. 81-84.
54. *Езирганян А.М.* Новые перспективы развития рентгеновской коротковолновой голографии // *Письма в ЖЭТФ.* - 1988. - **24**, №10. - С.55-59.
55. *Езирганян А.М., Труни К.Г., Мктчян А.Р.* Рентгеновская интерферометрическая коротковолновая голография с дифракционной фокусировкой // *Письма в ЖЭТФ.* - 1998. - **68**, №9. - С.681-684.
56. *Drmevyan H.R.* X-Ray interferometric investigation of homogeneity of substance // *Phys. stat. solidi.* - 2003. - **137**. - P.57-66.

57. *Drmeyan H.R.* X-Ray interferometric investigation of homogeneity of substances // *Cryst. Reser. and Technology*. - 2003. - **38**. - P. 450-456.
58. *Aboyan O, Arshakya E.* X-Ray interferometric investigation of radiation induced imperfection of Silicon crystal // *Phys. Sttat. Solid*. - 2006. - **137**. - P.57-66.
59. *Дроздовський В.Б., Михайлюк І.П., Раранський Н.Д.* Определение показателей преломления методом рентгеновской интерферометрии // *УФЖ*. - 1972. - **17**, №7. - С.1212-1214.
60. *Дроздовський В.Б., Михайлюк І.П., Раранський Н.Д.* Интерферометрическое исследование показателей преломления // *УФЖ*. - 1972. - **17**, №8. - С.1384-5.
61. *Дроздовський В.Б., Михайлюк І.П., Раранський Н.Д.* Исследование аномального рассеяния рентгеновских лучей вблизи К-края поглощения с помощью трехкристалльного интерферометра // *УФЖ*. - 1974. - **19**, №7. - С.1214-1215.
62. *Раранський Н.Д., Шафранюк В.П.* Изображение дефектов упаковки в рентгеновском дифракционном муаре // *УФЖ*. - 1982. - **27**. - №6. - С.901-904.
63. *Раранський Н.Д.* Использование рентгеновской интерферометрии для изучения дефектов структуры в монокристаллах // Всесоюзное совещание "Проблемы рентгеновской диагностики несовершенства кристаллов", Ереван. - 1985. - С.117-131.
64. *Раранський Н.Д., Шафранюк В.П., Фодчук І.М.* Рентгеноинтерферометрическое изображение полей деформаций вокруг дислокационных скоплений // *Металлофизика*. - 1985. - **7**, №5. - С.63-71.
65. *Раранський Н.Д., Шафранюк В.П., Фодчук І.М.* Муаровые изображения полос роста в бездислокационном монокристалле Si. // *УФЖ*. - 1985. - **30**, №1. - С.133-135.
66. *Раранський Н.Д., Шафранюк В.П.* Дефекты границ сопряжений и релаксация напряжений в эпитаксиальных системах Si-Si, Ge-Si, Ge-Si // *УФЖ*. - 1985. - **30**, №1. - С.127-132.
67. *Раранський Н.Д., Фодчук І.М., Шафранюк В.П.* Рентгено-топографические и интерферометрические изображения полей упругих деформаций, возникающих при действии внешних сосредоточенных сил на Si // Черновицкий госуниверситет, Черновцы, 1985. - Деп. в Укр. НИИТИ 15.07.85, №1432Ук - 85 Деп.
68. *Шафранюк В.П.* Изучение дефектов структуры в реальных кристаллах с помощью рентгеновской интерферометрии: Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук. - Чернівці, 1986. - 16 с.
69. *Раранський М.Д.* Маятниковые и мауровые полосы в реальных кристаллах: Автореф. дис. ... докт. фіз.-мат. наук. - Чернівці, 1987. - 24 с.
70. *Раранський Н.Д., Фодчук І.М., Сергеев В.Н. и др.* Влияние ультразвуковых деформаций на муаровые картины // *Металлофизика*. - 1993. - **15**, №2. - С.72-79.
71. *Струк Я.М.* Исследование дифракционных эффектов в деформированных монокристаллах методами маятниковых полос и рентгеновской интерферометрии: Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук. - Чернівці, 1993. - 16 с.
72. *Raransky N.D., Struk Ja.M., Fodchuk I.M. et all* Applied possibilities of a X-Ray diffraction interferometry // *Proc. SPIE. Bellingham*. - 1995. - **2647**. - P.457-467.
73. *Никитенко В.И., Мишляев М.М., Еременко В.Т.* О пластической деформации кремния в области хрупкого разрушения // *ФТТ*. - 1967. - **9**, №2. - С.2604-2610.
74. *Раранський М.Д.* Нормальна й аномальна дисперсія рентгеновських хвиль // *Науковий вісник ЧДУ*. - Вип. 57: Фізика. - Чернівці: ЧДУ, 1999. - С.5-11.
75. *Фодчук І.М., Раранський М.Д., Струк Я.М. и др.* Муарові зображення дефектів у рентгеновській трикристалній інтерферометрії // *Науковий вісник ЧНУ*. Фізика. Електроніка. - 2000. - Вип. 92. - С.14-19.
76. *Фодчук І.М., Раранський М.Д., Струк Я.М. и др.* Муаровые изображения дефектов в рентгеновской трехкристалльной интерферометрии // *Металлофизика и новейшие технологии*. - 2002. - **24**, - №5. - С.617-628.
77. *Фодчук І.М., Раранський М.Д., Струк Я.М. и др.* Рентгеновська LLL-інтерферометрія деформованих зосередженою силою кристалів // *УФЖ*. - 2002. - **47**, №11. - С.1057-1064.
78. *Фесів І.В., Струк Я.М., Фодчук І.М. и др.* Прикладні можливості X-променевої інтерферометрії // *Науковий вісник ЧНУ*. Фізика. Електроніка.. - 2009. - Вип. 438. - С. 20-39.
79. *Пинскер З.Г.* Рентгеновская кристаллооптика. - М.: Наука, 1982.
80. *Федоров А.А., Колесников А.В., Василенко А.П. и др.* Эпитаксиальный пленочный рентгеновский интерферометр – инструмент для изучения структуры полупроводниковой гетеросистемы // *Приборы и техника эксперимента*. - 2000. - №2. - С. 135-139.
81. *Василенко А.П., Федоров А.А., Колесников А.В. и др.* Применение эпитаксиального пленочного рентгеновского интерферометра для прецизионного исследования структуры полупроводниковой гетеросистемы // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. - 2002. - **68**, №4. - С. 25-29.
82. *Фрицлер К.Б., Труханов Е.М., Калинин В.В. и др.* Качество монокристаллического кремния и некоторые проблемы рентгеновской интерферометрии // *Поверхность*. - 2003. - №9. - С.67.
83. *Fedorov A.A., Trukhanov, A.P. Vasilenko, A.V. et all* X-Ray interference topography investigation of Si/Ge_xSi_{1-x}/Si(001) heterosystem // *J. of Physics D: Applied Physics*. - 2003. - **36**. - P.A44-A48.
84. *Милер М.* Голография - Ленинград: Машиностроение. - 1979.
85. *Франсон М.* Голография. - М.: Мир, 1972.
86. *Takagi S.* A dynamical theory of diffraction for a distorted crystal // *J. Phys. Soc. Japan*. - 1969. - **26**, №5. - P.1239-1253.