

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені Ю. ФЕДЬКОВИЧА

На дровах рукопису

Фодчук Ігор Михайлович

ДВО- І БАГАТОХВИЛЬОВІ РЕНТГЕНОАКУСТИЧНІ ЕФЕКТИ В
ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ І ТОПОГРАФІЇ РЕАЛЬНИХ КРИСТАЛІВ

01.04.07 - фізика твердого тіла

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ - 1994

Робота виконана на кафедрі фізики твердого тіла
Чернівецького держуніверситету імені Ю.Федьковича.

Офіційні опоненти: член-кореспондент АН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор Молодкін В.Б.;
доктор фізико-математичних наук,
професор Даценко Л.І.;
доктор фізико-математичних наук,
професор Новіков М.М.

Провідна організація - Інститут Фізики АН України.

Захист відбудеться *9 листопада* 1994р. о *14*-ій годині
на засіданні спеціалізованої Ради Д.016.37.01 при Інституті
Металофізики АН України (м.Київ, пр.Вернадського, 36, кон-
ференц-зал Інституту Металофізики АН України).

Дисертація для ознайомлення знаходиться у науковій бібліотеці
Інституту Металофізики АН України. Відгуки на автореферат у
двох екземплярах, завірених печаткою установи, просимо надси-
лати за адресою: 252680, ГСП, Київ-142, пр. Вернадського, 36,
Інститут Металофізики АН України.

Автореферат розісланий *30 бересня* 1994р.

Вчений секретар Спеціалізованої
Ради Д.016.37.01,
кандидат фізико-математичних наук: *Мадат* - З.Г.Мадатова.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка
00777708 (-)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Дисертація присвячена теоретичному і експериментальному дослідженню закономірностей впливу дефектів структури на рентгенодифракційні і рентгеноакустичні ефекти в кристалах та розвитку, на основі одержаних результатів, нових топографічних і дифрактометричних методів структурної діагностики реальних кристалів.

Актуальність проблеми. Більшість сучасних методів дослідження структури реальних кристалів базується на дифракційних явищах, які виникають при взаємодії випромінювання з речовиною. Серед них особливе місце займають методи, які ґрунтуються на використанні ефектів динамічного розсіювання рентгенівських променів. Найбільш чутливими до структурних недосконалостей в кристалах є інтерференційні методи маятникових і муарових смуг, які виникають внаслідок когерентної взаємодії хвильових полів в кристалі. Одним із найбільш важливих характеристик методу рентгенівського дифракційного муару є надзвичайно висока чутливість до незначних деформацій і поворотів кристалічної ґратки. Метод маятникових смуг дозволяє визначати атомні амплітуди розсіювання, середньоквадратичні динамічні і статичні зміщення атомів з положення рівноваги і пружні деформації в кристалах. Унікальне фазове збільшення, що досягається методом рентгенодифракційного муару, дозволяє, на відміну від високороздільної електронної мікроскопії, не руйнуючи об'єкт безпосередньо спостерігати атомні ряди кристалічної ґратки.

Труднощі, які виникають при інтерпретації рентгенооптичних зображень дефектів в кристалах, пов'язані з різноменітністю явищ, що відбуваються при розповсюдженні блохівських

хвиль в реальних кристалах. Явище рефракції блохівських хвиль в слабодетформованих кристалах та ефекти міжвіткового розсіяння в сильно спотворених областях часто породжують складні зображення навіть найпростіших дефектів. Це свідчить про те, що картини дифракційного контрасту несуть інформацію не стільки про характер полів зміщень навколо дефекта, скільки про особливості геометрії експерименту і механізми дифракції. Тому для однозначної інтерпретації багатoinформативних інтерференційних картин необхідно створювати такі експериментальні умови їх отримання, за яких механізми формування дифракційного контрасту виявляються найбільш повно і чітко і разом з тим легко піддаються кількісній оцінці.

Відомо, що багато макроскопічних властивостей кристалу визначаються усередненими (статистичними) характеристиками його реальної структури. Тому важливого значення набуває розширення можливостей дифрактометричних методів дослідження дефектів структури кристалів, які базуються на особливостях розподілу інтенсивності розсіяного випромінювання в просторі оберненої ґратки.

Останнім часом значний інтерес викликають дослідження дифракції рентгенівських променів в акустично збуджених кристалах. Періодичність деформацій акустичного хвильового поля дозволяє провести наочний і послідовний аналіз закономірностей дифракційної взаємодії рентгенівських променів з реальним кристалом. Крім того, акустична дія дозволяє керувати рентгенівським хвильовим полем всередині кристалу, що значно розширює можливості методів ідентифікації різних структурних недосконалостей. Досягнення динамічної теорії розсіяння рентгенівських променів реальними кристалами, а

також успіхи в розумінні механізмів рентгеноакустичних взаємодій в досконалих і майже досконалих кристалах, дозволяють сподіватися, що встановлення фізичної природи і механізмів рентгеноакустичної взаємодії в кристалах з різним типом дефектів суттєво збільшить можливості одержання якісної і кількісної інформації про спотворення кристалічної ґратки. Це значно розширить границі використання традиційних топографічних методів, а також створить передумови появи нових методів, що і визначає актуальність теми досліджень.

Необхідно підкреслити, що складність аналітичного опису рентгеноакустичних та інших дифракційних ефектів при топографії і інтерферометрії реальних монокристалів, потребує для аналізу і інтерпретації результатів подальшого розвитку і застосування методів математичного моделювання процесів динамічного розсіяння на сучасних швидкодіючих ЕОМ.

Метою даної роботи є вивчення дифракційних та рентгеноакустичних ефектів в інтерферометрії і топографії реальних кристалів. При цьому вирішувались наступні конкретні задачі:

1. Виявлення закономірностей і механізмів формування дифракційних зображень м'язникових і музорових смуг в слабо- і сильнодеформованих монокристалах при дії зовнішнього зосередженого навантаження.

2. Дослідження закономірностей впливу смуг росту і свірлових дефектів на характер амплітудної залежності інтегральної відбиваючої здатності кристалу і оцінка неоднорідності акустичного хвильового поля.

3. Визначення впливу параметрів ультразвукової хвилі на формування дифракційних зображень дислокацій різного типу в тонкому і товстому кристалах кремнію.

4. Виявлення механізмів формування дифракційного контрасту мікродфектів типу вакансії і втілення в умовах рентгеноакустичного резонансу.

5. Вивчення особливостей багатохвильової дифракції в акустично збудженому кристалі.

6. Розробка методів дослідження структурних змін в тонких приповерхневих шарах монокристалів в косонесиметричній схемі дифракції.

Наукова новизна роботи визначається сукупністю результатів, сформульованих у висновках до дисертації і наведених на закінчення автореферату. Основні нові результати дисертаційної роботи:

1. Вперше експериментально виявлені "деформаційні" смуги в інтерферометричному зображенні при дії зовнішньої зосередженої сили на клиновидний аналізатор інтерферометра. Встановлено, що виникнення "деформаційних" смуг обумовлено міжвітковим характером взаємодії нових, породжених в сильно деформованій області кристалу, і "старих" хвильових полів. Експериментально встановлені закономірності формування інтерферометричних зображень дефектів, що знаходяться в різних компонентах інтерферометра.

2. Розроблені і адаптовані алгоритми математичного моделювання дифракційних зображень різних дефектів структури в акустично збуджених кристалах. Теоретично і експериментально показана можливість керування рентгенівським хвильовим полем в кристалі параметрами акустичної хвилі. Встановлені і проаналізовані механізми формування дифракційних зображень мікродфектів та дислокацій різного типу і орієнтацій в залежності від параметрів акустичної хвилі. Запропонований

рентгеноінтерферометричний спосіб визначення локального абсолютного значення амплітуди і оцінки міри однорідності ультразвукового поля в кристалі.

3. Вперше проведені теоретичні і експериментальні дослідження впливу параметрів акустичних полів зміщень на багатохвильові рентгенодифракційні динамічні ефекти. Встановлено, що при певних орієнтаціях вектора акустичної хвилі по відношенню до некомпланарних векторів дифракції реалізується від одного до $N-1$ рентгеноакустичних резонансів. Виявлено, що при наявності в кристалі еквідистантного згину атомних площин в умовах рентгеноакустичного резонансу спостерігається інверсія подавлення ефекту аномального проходження рентгенівських хвильових полів. Запропонований багатохвильовий дифрактометричний метод визначення компонент тензора деформації і оцінки реального напруженого стану кристалу.

4. Вперше для неруйнующого пошарового аналізу структурних змін в тонких приповерхневих шарах (до ~ 0.01 мкм) використано косонесиметричну схему дифракції на відбивання з подальшим азимутальним скануванням кристалу навколо вектора дифракції. Дана схема дифракції відкриває нові можливості пошарової топографії і дифрактометрії тонких приповерхневих шарів кристалу.

Наукова і практична значимість роботи. Отримані в роботі дифракційні ефекти, механізми і закономірності розсіяння рентгенівських променів можуть бути практично використані як для розробки нових неруйнующих дифракційних методів дослідження монокристалів, так і для подальшого розвитку динамічної теорії розсіяння рентгенівських променів.

Одержані закономірності формування муарових зображень

дефектів розширюють можливості використання рентгенівського дифракційного муару, і застосовані для вдосконалення методів прецизійного визначення полів деформацій складних комплексів дефектів.

Виявлені в роботі дифракційні ефекти і механізми формування зображень дефектів різного типу в акустично збудженому кристалі можуть бути використані для розробки нових високороздільних топографічних і дифрактометричних методів структурної діагностики кристалів.

Обґрунтована перспектива використання ультразвукового поперечного хвильового поля як своєрідного зонду для виявлення мікродефектів на рентгенівських топограмах, розміри яких знаходяться нижче рівня роздільної здатності традиційної топографії, а також для спрямованого керування рентгенівським хвильовим полем в кристалі.

Результати досліджень, які ввійшли в дисертацію, використовуються в наукових лабораторіях Інститутів Металофізики, Фізики Напівпровідників і Фізики АН України, Інституті Кристалографії АН Росії, МДУ ім. М.Ломоносова, Чернівецькому держуніверситеті ім. Ю.Федьковича для вирішення деяких важливих проблем напівпровідникового матеріалознавства і мікроелектроніки, а також при підготовці курсів лекцій з рентгенографії кристалів та кристалооптики.

Основні положення, що виносяться на захист.

1. При дії зовнішньої зосередженої сили на кристал з переходом до сильних деформацій змінюються механізми формування муарових і топографічних зображень пружних полів. Для слабких деформацій, зображення, в основному, відображають функції локальних розорієнтацій; для сильних деформацій - її

похідну. Це обумовлено переходом від ейконального до міжвіткового характеру розсіяння рентгенівського випромінювання із збільшенням навантаження.

2. Механізми формування інтерферометричного і топографічного зображень окремих дефектів в акустично збудженому кристалі визначаються відношенням довжини хвилі ультразвуку до екстинкційної довжини, а також величиною амплітуди ультразвукової хвилі. У випадку рентгеноакустичного резонансу зміна амплітуди обумовлює періодичне проходження мінімумів товщинних осциляцій когерентної складової дифрагovanого випромінювання через місцеположення дефектів. Це забезпечує збільшення розмірів зображення дефектів як для кінематичної, так і для динамічної складових розсіяння.

3. Багатохвильові рентгенодифракційні ефекти в кристалах з одномірним полем деформацій більш різноманітні за двохвильові. В акустично збудженому кристалі при певних орієнтаціях вектора зміщення акустичної хвилі по відношенню до вектора зв'язуючого відбивання, виникає $N-1$ резонанс. При цьому деякі з них більш чутливі до слабких спотворень кристалічної ґратки, ніж двохвильові. Це обумовлено або зняттям заборони на пряму взаємодію дифрагovanних хвиль, або підсиленням ефекту аномального проходження, а при певних умовах - збільшенням його подавлення.

4. В косонесиметричній схемі дифракції на відбивання азимутальним скануванням навколо вектора дифракції реалізується неперервне зменшення екстинкційної довжини до декількох десятків ангстрем. Це відкриває нові можливості неруйнівного дифрактометричного і топографічного пошарового аналізу структурних змін в поверхневих шарах.

Апробація роботи. Результати досліджень, що лягли в основу дисертації, доповідались і обговорювались на таких конференціях, нарадах і семінарах: XIII Всесоюзній нараді по застосуванню рентгенівських променів для дослідження матеріалів (Москва, 1982р.), II Всесоюзній нараді "Методи і апаратура для дослідження когерентної взаємодії випромінювання з речовиною" (Єреван, 1982р.), Всесоюзній нараді "Візуалізація рентгенодифракційних зображень дефектів в кристалах" (Єреван, 1983р.), IV Всесоюзній нараді "Дефекти структури в напівпровідниках" (Новосибірськ, 1984р.), Всесоюзній нараді "Проблеми рентгенівської діагностики недосконалостей кристалів" (Єреван, 1985р.), III Всесоюзній нараді "Когерентна взаємодія випромінювання з речовиною" (Ужгород, 1985р.), I Всесоюзній науково-технічній конференції "Прикладна рентгенографія металів" (Ленінград, 1986р.), II Всесоюзній нараді по міжвузівській комплексній програмі "Рентген" (Чернівці, 1987р.), IV всесоюзній нараді по когерентній взаємодії випромінювання з речовиною (Юрмала, 1989р.), XII Європейському кристалографічному конгресі (Москва, 1989р.), III Всесоюзній нараді по міжвузівській комплексній програмі "Рентген" (Чернівці, 1989р.), конференції по динамічному розсіяню рентгенівських променів в кристалах з динамічними і статичними спотвореннями (Казивелі, 1990р.), Міжреспубліканському семінарі "Сучасні методи і апаратура рентгенівських дифрактометричних досліджень матеріалів в особливих умовах" (Київ, 1991р.), IV міжнародній конференції з фізики і технології тонких плівок (Івано-Франківськ, 1993р.), Двілітній конференції Інституту електронної фізики (Ужгород, 1993р.), II Європейському симпозиумі "Рентгенівська топографія і високороздільна

дифрактометрія" (Берлін, 1994р.) і семінарах кафедри ФТТ ЧДУ.

Особистий внесок. Дослідження, представлені в дисертації, є результатом самостійної роботи автора, якому також належать: постановка теоретичних розрахунків, висновки окремих глав, загальні висновки дисертації і основні положення, що виносяться на захист. Окремі положення експериментально перевірялись у співавторстві із співробітниками кафедри ФТТ Чернівецького держуніверситету.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 30 друкованих праць, приведених на закінчення автореферету. В роботах, написаних у співавторстві, автор приймав таку участь: в роботах 2, 4-30 - постановка задачі досліджень; 2-8, 10, 11, 14-30 - виконання теоретичних розрахунків; 1, 9, 12, 13 - виконання експериментальних досліджень. Автор приймав також участь в обговоренні і оформленні всіх робіт.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається із вступу, шести глав, закінчення, списку літератури з 260 джерел і додатку. Виклад зроблено на 340 сторінках друкованого тексту, що містять 103 рисунки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі обґрунтовується актуальність вибраної теми досліджень, сформульовані мета і основні задачі роботи, її наукова новизна, практична значимість одержаних результатів, подано положення, які виносяться на захист, а також відомості про апробацію.

В першій главі, що є оглядом літератури по темі дисертації, викладені основні положення динамічної теорії дифракції рентгенівських променів в досконалих і спотворених крис-

талах. Розглянуті окремі ефекти двох- і багатохвильового динамічного розсіювання рентгенівських променів в досконалих і реальних монокристалах. Проведений детальний аналіз публікацій, які присвячені теоретичному і експериментальному дослідженню особливостей розсіювання рентгенівських хвиль в акустично збуджених кристалах. Подано також літературний огляд розвитку теорії і практичного використання методів дослідження структурних змін в тонких приповерхневих шарах, сформульовано основні завдання роботи.

В другій главі приведені результати експериментальних і теоретичних досліджень механізмів і закономірностей формування дифракційних зображень маятникових і музорових смуг в слабо- і сильнодеформованих кристалах. Експериментальні дослідження проводились з використанням трьохкристального LLL-інтерферометра з клиновидним аналізатором. Деформаційне поле створювалось дією зовнішньої зосередженої сили P на тонку частину аналізатора перпендикулярно вектору дифракції H_{220} . При цьому виникали такі області спотворень, в яких значення функції локальних розорієнтацій змінювались від $|\alpha(r)| \geq 0$ до $\alpha(r) \gg \chi_0$. Теоретичні дослідження проводились шляхом числового рішення рівнянь Такагі для випадку падаючої плоскої хвилі.

Із одержаних результатів слідує, що поступове збільшення величини зосередженої сили на кристал приводить спочатку до значного зменшення, а потім до збільшення початкових значень періодів маятникових смуг, змінюється їх форма. Максимальні повороти маятникових смуг мають місце біля напрямків, які визначають області нульових значень функції $\alpha(r)$. Найбільші зміни періодів маятникових смуг - вздовж напрямків максимальних значень $\alpha(r)$. В області слабких деформацій го-

ловним механізмом, що формує зображення маятникових смуг, є викривлення траєкторій блохівських хвиль. Додаткова різниця фаз, що виникає при цьому, проявляється на рентгенівських топограмах у вигляді спотворених маятникових смуг, причому трансформація їх в цілому відображає складний характер поля деформацій. В області, близькій до точки прикладення сили, маятникові смуги зникають і з'являється рентгенівське зображення у вигляді трьохпелюсткової розетки, яка майже повністю повторює вигляд функції $\alpha(r)$.

При певних значеннях P , коли зміна ефективної довжини поля деформацій порядку або більша екстинкційної довжини, розповсюдження рентгенівських хвиль супроводжується процесами міжвіткового розсіяння. Тут зміни в формуванні зображення відбуваються таким чином, що нові пелюстки розетки орієнтовані в напрямках найбільших змін деформацій. Розподіл інтенсивності на теоретичних і експериментальних топограмах суттєво відрізняється від вигляду $\alpha(r)$. Товщинні осциляції інтенсивності мають місце тільки у вузькій області вздовж лінії дії сили (рис. 1а, б), величини їх періодів перевищують значення періодів звичайних маятникових смуг на 20-30%. Даний ефект в роботі пояснюється процесами міжвіткового розсіяння в сильно деформованих областях кристалу не такому прикладі. Близьке поле зосередженої сили замінюється на пружне поле двох сімейств дефектів пакування, розміщених певним чином в площині розсіяння. Це дозволило виділити хвилі, які дзеркально відбиваються від ближнього поля дефектів, і хвилі, які зазнають повного внутрішнього відбивання і ковзають вздовж поля сильних деформацій, як у хвильоводі. Показано, що в залежності від різниці фаз в сильно деформованій облас-

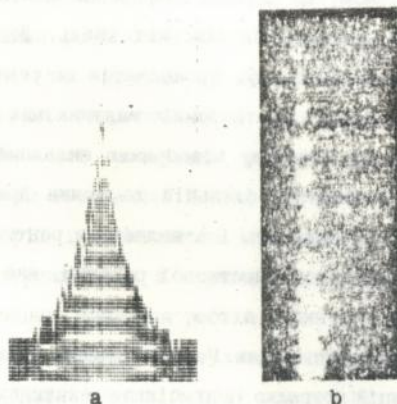


Рис.1. Топограми, одержані при дії зовнішньої зосередженої сили на клиновидний аналізатор інтерферометра у випадку сильних деформацій: а) розрахункова топограма; б) експериментальна топограма, одержана в схемі ІЛЛ-спектрометра, CuK_α -випромінювання, (220) відбивання.

ті кристалу екстинкційна довжина може бути менша або більша свого початкового значення. Це пов'язане з тим, що в області слабких спотворень рух точки збудження по дисперсійній поверхні приводить до збільшення міжвіткової відстані l , як наслідок, до зменшення екстинкційної довжини. В області сильних спотворень відбувається розмиття вузлів оберненої ґратки, що приводить до зменшення міжвіткової віддалі l виникнення міжвіткових ефектів, які в цілому і обумовлюють збільшення екстинкційної довжини.

При незначних величинах зосередженого навантаження P в тонкій частині клиновидний аналізатора інтерферометра вияв-

лено два сімейства інтерференційних смуг: звичайні муарові смуги, які направлені радіально до точки прикладення сили, і "деформаційні" смуги, які майже перпендикулярно перетинають перші. Встановлена аномальність поведінки таких "деформаційних" смуг: їх контрастність зростає із збільшенням величини прикладеної сили, вони набувають випуклої форми, а їх вершини розміщуються вздовж ліній дії сили і направлені в товсту частину кристалу. Поява аномальних "деформаційних" смуг пояснюється зміною фазових співвідношень слабо- і сильнопоглинаючих хвильових полів, які інтерферують у деформованому аналізаторі.

В третій главі наведені результати експериментальних досліджень особливостей формування муарових смуг в трьох-кристальному рентгенівському інтерферометрі при дії різного типу зовнішніх сил.

Характерною особливістю інтерферометричного методу є можливість роздільного визначення дилатаційної ($\Delta d/d \sim 10^{-8}$) та ротаційної ($\delta \sim 0.01''$) складових деформації з високою точністю із планарного розподілу муарових смуг.

Вибором точки прикладення сили та зміною в широких межах її величини на S-пластині інтерферометра проведено моделювання різних варіантів вихідного структурного муару з подальшим дослідженням його впливу на формування муарових зображень різного типу дефектів. Дією зосередженої сили на S-пластину і нанесенням подряпини на A-пластину моделювалися різноманітні випадки формування муарових зображень.

Встановлено, що інтерференційна картина, яку можна одержати методом рентгенівського дифракційного муару, є результатом сумарної когерентної фазової взаємодії зображень

дефектів, що знаходяться в усіх компонентах інтерферометра. При великих значеннях деформацій спостерігається складна взаємодія зображень. Показано, що найбільш помітних змін зазнають ті області зображення подряпини, які характеризуються незначними величинами деформацій, і які розміщені в областях з малим періодом вихідного структурного муару. Вказується на можливість використання трьохкристального рентгеновського інтерферометра для формування фазових об'єктів в рентгеновській фотолітографії.

Встановлено, що наявність вихідного структурного муару приводить до появи похибок в оцінках значень величин деформацій дефектів на величину $(\Delta d/d)_{\text{отр}}$, яку завжди необхідно враховувати при проведенні досліджень.

Використання рентгеновського трьохкристального інтерферометра, як найбільш високочутливого приладу до слабких спотворень кристалічної ґратки, дозволило визначити не тільки регулярність акустичного поля в широкому частотному діапазоні, але й виявити нові динамічні ефекти розсіяння на акустичній надґратці. Встановлено, що найбільш ефективна дія ультразвукових коливань на інтерференцію рентгеновських променів відбувається при частотах ν_a , близьких до рентгеноакустичного резонансу.

При збудженні акустичного поля в аналізаторі трьохкристального інтерферометра максимальні зміни в періодах муарових смуг спостерігаються при виконанні умови рентгеноакустичного резонансу (рис.2). В певних інтервалах зростання амплітуди ультразвуку відбувається як збільшення, так і зменшення ротаційної складової відносно початкового значення. Аномалія поведінки приросту кількості муарових смуг $\Delta n(U)$ на

рис.2 обумовлена дисперсійним характером залежності екстинкційної довжини від довжини ультразвукової хвилі. Даний ефект можна пояснити на основі аналізу зміни ефективної екстинкційної довжини в залежності від довжини хвилі ультразвуку. Встановлено, що при частоті ультразвуку ν_s^1 приріст до екстинкційної довжини в шість разів більший, ніж при ν_s^2 . Вказується, що у випадку однорідного акустичного хвильового поля виникає можливість визначення різниці фаз інтерферуючих рентгенівських хвиль в аналізаторі із муарових картин.

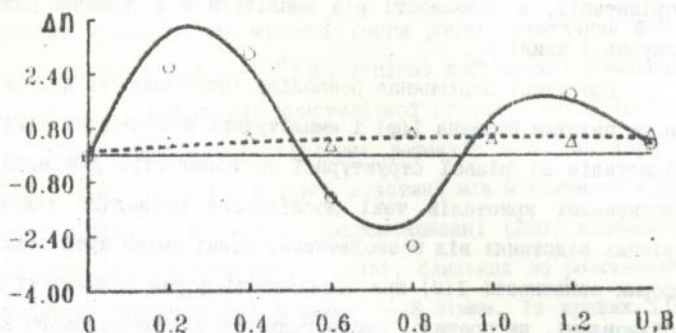


Рис.2. Залежність зміни кількості муарових смуг $\Delta n(U)$.

o - $\nu_s^1 = 118,57$ МГц; Δ - $\nu_s^2 = 72,21$ МГц.

Із зміни періодів муарових смуг і відповідних їм величин ротаційних деформацій $\Delta\delta$ з допомогою співвідношення

$$w_s = \Delta\delta \left| \frac{K}{K_s} \right| \frac{1}{\cos(\theta)} \frac{1}{|N|}$$

проведена оцінка однорідності і величини амплітуди ультразвукового поля (K і K_s - хвильові вектори рентгенівської і акустичної хвиль). Показано, що при $U=0,3$ В значення амплітуди ультразвуку в кристалі рівне $w_s = 1,7 \cdot 10^{-2}$ см.

Таким чином, варіація параметрів ультразвукової хвилі дозволяє керувати інтерференційним хвильовим полем в кристелах, а по зміні дилатаційної і ротаційної складових ультразвукового деформаційного поля визначати міру однорідності і локальне значення амплітуди ультразвуку в кристалах.

В четвертій главі наведені результати експериментальних і теоретичних досліджень впливу структурних дефектів типу смуг росту і свірлових дефектів на рентгенсакустичну взаємодію, а також механізмів та закономірностей формування рентгенівського дифракційного зображення дефектів різного типу і орієнтації, в залежності від амплітуди W і довжини ультразвукової хвилі λ_s .

Проведені порівняння розподілу інтенсивності вздовж основи палатки Бормана $I(\varphi)$ і амплітудних залежностей $I(U)$ для кристалів Si різної структурної досконалості. Для найбільш досконалих кристалів такі дослідження проведені також на різних відстанях від п'єзодатчика. Деякі зміни кута нахилу і форми залежності $I(U)$ при постійності форми залежності $I(\varphi)$ обумовлені, як правило, неоднорідністю ультразвукового поля, причому флуктуації неоднорідності ультразвукового поля на різних відстанях від п'єзодатчика носять нелінійний характер. В деяких випадках на характер поведінки $I(U)$ одночасно впливають як неоднорідності кристалу, так і флуктуації амплітуди ультразвуку.

Із резонансних кривих $I(\lambda_s/\lambda)$, одержаних для (220) дифракції $AgK_{\alpha 1}$ - випромінювання, визначені атомний фактор f , відповідно, екстинкційна довжина $\Lambda=46.18$ мкм для кристалу, який містить смуги росту. Дане значення Λ дещо менше, ніж Λ для еталонних зразків ($\Lambda_s=46.65$ мкм). Така невідповідність

обумовлена, напевне, спотвореннями кристалічної ґратки смугами росту. Для таких кристалів на кривих залежностей $I(\varphi)$ в області довжин ультразвуку $\lambda_s < \Lambda$ відсутній вузький пік інтенсивності в центрі палатки Бормана, а залежність $I(U)$ при $\lambda_s = \Lambda$ зміщена вгору по осі ординат. Такі зміни $I(\varphi)$ і $I(U)$ обумовлені збільшенням дифузної компоненти розсіяння і зменшенням ролі когерентної складової за рахунок додаткових втрат енергії при дифузному розсіянні на смугах росту. Порівняльний аналіз залежностей $I(\varphi)$ і $I(U)$ для еталонного і досліджуваного зразків дозволив одержати наступні числові характеристики кристалу, що містить смуги росту: статичний фактор Дебая-Валера - $L=4.1 \cdot 10^{-2}$; коефіцієнт дифузного поглинання - $\mu_d=4.1 \text{ см}^{-1}$; деформація кристалічної ґратки - $\epsilon=1.8 \cdot 10^{-6}$.

Досліджено вплив свірлових дефектів в S_1 на характер $I(U)$ і $I(\varphi)$. По зміні кутової відстані між мінімумами кривих $I(\varphi)$, одержаних в $\text{AgK}\alpha_1$ - випромінюванні (220) відбивання, при довжинах ультразвукової хвилі, близьких до резонансної, визначене екстинкційна довжина $\Lambda=46.3 \mu\text{м}$. Із кривих $I(U)$, одержаних при $\mu t=5$ і (440) відбиванні, через параметри L і μ_d визначені характерні розміри мікрodefektів $R \approx 5 \mu\text{м}$ і їх густина $n=5 \cdot 10^2 \text{ см}^{-3}$.

Для аналізу впливу на дифракцію рентгенівських хвиль комбінованих деформаційних полів ультразвуку і окремих структурних дефектів розроблена методика математичного моделювання їх дифракційного зображення. Адаптовані алгоритми числового розв'язку фундаментальної системи рівнянь динамічної теорії для суперпозиції плавних і швидкозмінних полів деформацій, розподілених по об'єму кристалу. Проведені числові дослідження впливу параметрів ультразвукової поперечної хви-

лі на формування дифракційних зображень дислокацій різного типу на секційних і проєкційних топограмах. При збудженні в кристалах ультразвуку з довжиною хвилі, що рівна екстинкційній довжині, спостерігається помітне, а для деяких орієнтацій дислокацій і значне збільшення дифракційного контрасту зображення, а також його різновидна трансформація.

Аналіз розрахованих плоскохвильових топограм для кристалу проміжної товщини ($\mu t \sim 3$) показує, що в залежності від параметрів ультразвуку, контраст "стиркової" дислокації може суттєво змінюватись. Найбільш цікаві ефекти спостерігаються для випадку $\lambda_g = \lambda$ як в області слабких $\epsilon = 10^{-8}$ (ϵ - величина акустичної деформації $\epsilon = \pi w / \lambda_g$), так і для значних деформацій $\epsilon \sim 10^{-6}$. Слабкі деформації приводять до значно швидшого (в два рази) росту дифракційного контрасту пелюсток дислокації, ніж фону (рис.3б). Подаліше зростання w приводить в цілому до швидкого подавлення контрасту дислокації і розмірів області її виявлення. Великі значення ϵ розширюють області повного поглинання рентгенівського випромінювання і подавляють ефекти каналювання. Для проміжних значень ϵ , співрозмірних по величині з дислокаційними, внаслідок періодичного "перетискання" дислокації по товщині кристалу, відбувається викид інтенсивності в сильно поглинаючі області і її осцилюючий розподіл вздовж площини ковзання (рис.3с).

В нерезонансних випадках помітного розширення розмірів і росту інтенсивності пелюсток дислокації не спостерігалось. При цьому в короткохвильовому випадку подавлення контрасту прсходить швидше і при $w=1\lambda$ відбувається викид інтенсивності в області $\alpha(r) > 0$, тобто зміна контрасту пелюсток.

Для дислокації, перпендикулярної до площини розсіяння,

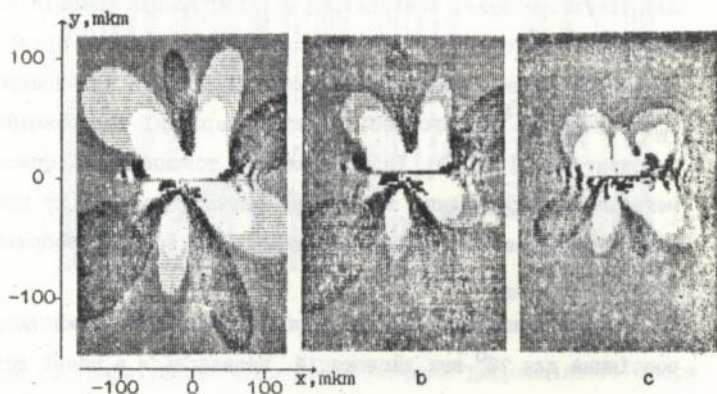


Рис.3. Розрахункові плоскохвильові топограми дифракційного контрасту "стирчкової" дислокації ($\mu t=3$) у випадку $\lambda_g = \Lambda$: а) $W=0$; б) $W=0.01\text{Å}$; с) $W=0.5\text{Å}$. На топограмі с) коефіцієнти контрасту збільшені на порядок порівняно з а)-б).

$\text{MoK}\alpha$ (446) $\mu t=1$ $\Lambda=54$ 2mkm $t_z=10.25\text{Å}$

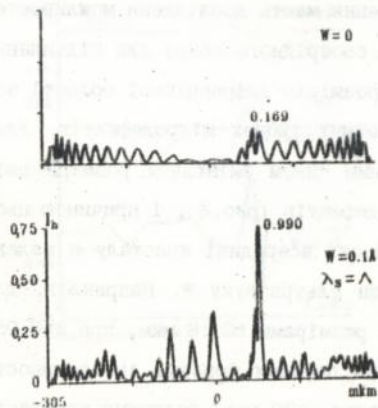


Рис.4. Розподіл інтенсивності $I_n(x)$ по основі палатки Вормана при знаходженні дислокації в пучності ультразвукової хвилі на глибині $z=10.25\text{Å}$: а) $W=0$; б) $\lambda_g = \Lambda$, $W=0.1\text{Å}$

нові хвильові поля, породжені деформаційними полями дислокації та ультразвуку, знаходяться у більш повній фазовій відповідності в пучності ультразвукової хвилі, ніж у вузлі. Це приводить до локального збільшення на порядок інтенсивності I_n в напрямку дифрагованої хвилі в середині дислокаційного "прожектора" (рис.4). Із збільшенням товщини роль фазового механізму у формуванні зображення значно зростає, що приводить до переважного росту інтенсивності прямого зображення дефекту.

Вплив ультразвукового поля на механізм міжвіткового розсіяння для 72° -них дислокацій виявляється в появі додаткових міжвіткових інтерференційних смуг та зростанні їх інтенсивності в характерній трикутній області зображення дислокації (рис.5). Окремо зазначимо, що суперпозиція полів деформацій гвинтової дислокації, орієнтованої паралельно вектору дифракції, і ультразвуку веде до зміни екстинкційної довжини, яка в першому наближенні описується співвідношеннями теорії геометричної оптики.

Важливе практичне значення мають дослідження можливостей застосування ультразвуку як своєрідного зонду для підсилення контрасту і для збільшення розмірів дифракційної області зображення невидимих в звичайних умовах мікродефектів. Ультразвукове поле може суттєвим чином змінювати розміри дифракційного зображення мікродефектів (рис.6), і причиною цього є перерозподіл інтенсивності всередині кристалу в залежності від величини амплітуди ультразвуку w . Наприклад, для мікродефектів типу вакансії розмірами ~ 0.16 мкм, при $w=0.05\text{Å}$ має місце зменшення майже на порядок фонової інтенсивності дифрагованої хвилі і збільшення (~ 30 раз) величини контраст-

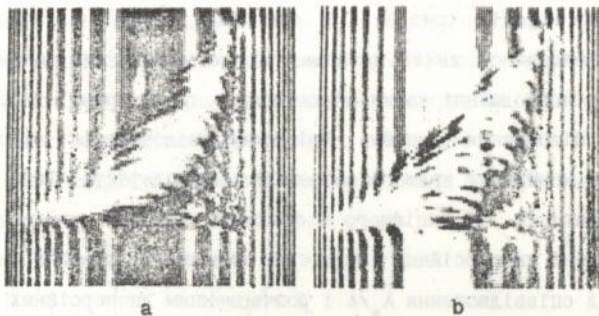


Рис.5. Розрахункові секційні топограми дифракційного зображення 72° -ної дислокації ($\mu\text{т}^{-1}$): а) $w=0$; б) резонансний випадок, $w=0.1 \text{ \AA}$.

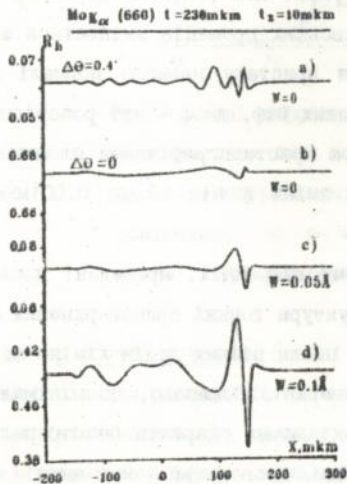


Рис.6. Розподіл інтенсивності $R_h(x)$ при : а) $w=0$, кутове відхилення $-\Delta\theta=0.4''$; б) $w=0$, с) $w=0.05 \text{ \AA}$; д) $w=0.1 \text{ \AA}$. Для б)-е) $\Delta\theta=0$. Мікродфект біля вхідної поверхні.

ності $V = (R_{\max} - R_{\min}) / (R_{\max} + R_{\min})$ прямого зображення мікрodefекту (рис.6с). В останньому випадку інтенсивність дифрагованої хвилі досягає тих же граничних значень, що й при знаходженні точки збудження на схилі кривої дифракційного відбивання (рис.6а). Крім того, відбувається також інверсія контрасту прямого зображення мікрodefекта. Такі аномалії поведінки дифракційного зображення дефектів можуть бути пояснені дисперсійним характером залежності довжини екстинкції від співвідношення λ_0 / λ і розчепленням дисперсійних віток.

П'ята глава присвячена реалізації можливостей косонесиметричної схеми дифракції на відбивання для дослідження рел'єфу поверхні і структурних змін в тонких приповерхневих шарах кристалу. На відміну від розглянутих вище випадків ціленапрямленої прямої чи опосередкованої дії на зміну екстинкційної довжини, в даній главі цей основний параметр динамічного розсіяння рентгенівських променів змінюється шляхом азимутального сканування кристалу навколо нормалі до тих відбиваючих площин, для яких $\theta < \phi$, де ϕ - кут розорієнтації між вхідною і відбиваючою кристалографічними площинами. При цьому можливий діапазон зміни λ від 10 до 0.001 мкм і менше.

Використовуючи дану схему дифракції, проведені дослідження рел'єфу поверхні і структури тонких приповерхневих шарів монокристалів CaTe, InSb після різних видів хіміко-механічної і лазерної обробки поверхні. Показано, що мінімальні розміри висот нерівностей, які можна одержати безпосередньо з топограм, рівні $\sim 2.5 \cdot 10^{-2}$ мкм. Проведений також аналіз основних закономірностей формування контрасту від дефектів на поверхні кристалів CaTe і InSb до і після лазерної дії. Піс-

ля імпульсного мілісекундного лазерного опромінення отримано уточнений розподіл деформацій в приповерхневих шарах з кри- вих дифракційного відбивання (рис.7), одержаних на двохкри- тальному (n, -m) спектрометрі в косонесиметричній схемі. Про- аналізовані перспективи ефективного використання даної схеми ДКС і топографії у випадку інших зовнішніх дій на поверхню кристалу.

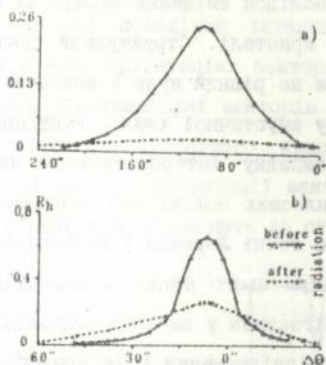


Рис.7.Криві дифракційного відбивання від монокристалу InSb а) $\varphi=26^\circ$; б) $\varphi=90^\circ$; -Δ-Δ- експериментальна крива до опромінення; -○-○- експериментальна крива після лазерного опромінення.

В шостій главі на основі розробленого алгоритму чисельного рішення рівнянь динамічної дифракції в реальних кристалах (рівнянь Такаґі) проведено дослідження впливу параметрів ультразвуку на ефект аномального проходження у випадку багатохвильової дифракції. Виявлено, що в залежності від орієнтації вектора зміщення акустичної хвилі $u(z)$ по відношенню

до векторів дифракції H_m в площині розсіяння можливі один, два або більше рентгеноакустичних резонансів. Для прикладу, на рис.8. демонструється залежність інтенсивності R_m дифрагованих хвиль від довжини хвилі ультразвуку для випадку трьоххвильової $(111, \bar{1}\bar{1}\bar{1})$ дифракції Лауе, $\text{CuK}_{\alpha 1}$ -випромінювання. Характерно, що при акустичному збудженні кристалу знімається заборона на пряму взаємодію дифрагованих R_{111} і $R_{\bar{1}\bar{1}\bar{1}}$ хвиль. Це відбувається внаслідок зміщення атомів із положень рівноваги в ідеальному кристалі. Структурний фактор зв'язуючого H_{200} відбивання уже не рівний нулю і визначається величинами амплітуди і періоду акустичної хвилі. Рентгеноакустичний резонанс в даному випадку інтерпретується як інтерференція старих і нових хвильових полів, які виникають в результаті зняття виродження в точці Лоренца і розчеплення дисперсійних віток. Підтвердженням цього факту є взаємодія дифрагованих хвиль, яка спостерігається у вигляді осциляцій інтенсивності в залежності від співвідношення λ_s/λ при орієнтації вектора $u(z)$ паралельно вектору зв'язуючого відбивання H_{200} (рис.8в), і її відсутність, коли ці вектори взаємно перпендикулярні (рис.8а). Зауважимо, що при першій орієнтації вектора $u(z)$ дана трьоххвильова конфігурація є найбільш чутливою до акустичних деформацій.

Експериментально досліджено вплив поперечних акустичних зміщень на багатохвильові конфігурації в схемі експерименту Ренінгера. Встановлено, що трьоххвильові квазікомпланарні конфігурації типу $(\bar{6}00, 351)$ та $(600, 35\bar{1})$ є найбільш чутливими до малих деформацій кристалічної ґратки. При збудженні в кристалі акустичних деформацій величиною $\epsilon = 1.3 \cdot 10^{-7}$, спостерігається зменшення інтенсивності та зміщення багатохвильо-

вих піків. Отримані результати дозволили використати багато-хвильову дифрактометрію для розробки методу визначення компонент тензора деформацій і оцінки напруженого стану кристалу в цілому.

Досліджено вплив на рентгеноакустичну взаємодію макродеформацій типу еквідистантного і експоненційного згину атомних площин у випадку трьоххвильової дифракції (111, $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$) як в тонкому ($\mu t < 1$), так і в товстому ($\mu t \sim 10$) кристалах Ge. Вивчені особливості поведінки інтенсивностей дифрагованих хвиль R_m при різних орієнтаціях вектора зміщення акустичної хвилі в площині трьоххвильових векторів дифракції. Виявлено, що як для тонкого, так і товстого кристалів еквідистантний згин атомних площин при орієнтації вектора $u|H_{200}$ - вектору зв'язуючого відбивання, приводить до суттєвої зміни характе-

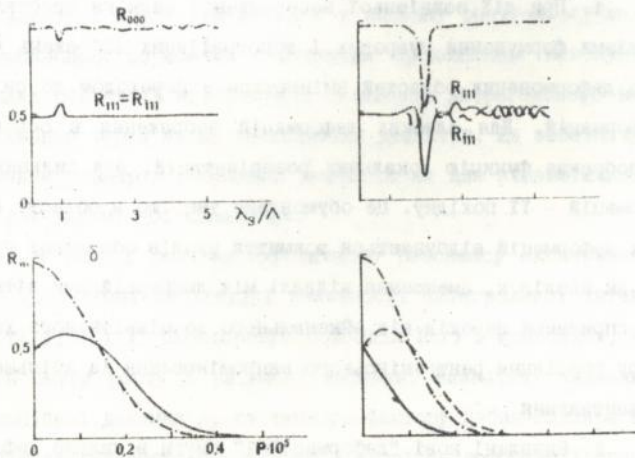


Рис.8. Залежності коефіцієнтів відбивання дифрагованих хвиль - $R_m(\lambda_s/\Lambda) = R_m(\lambda_s/\Lambda)/R_{000}(p=0)$ при $p=0.25 \cdot 10^{-5}$ у випадку: а) $u|H_{200}$, б) $u|\bar{H}_{200}$.

ру рентгеноакустичної взаємодії. В тонкому кристалі відбувається перерозподіл інтенсивності в області кристалу, де виконується умова резонансу. В товстому кристалі відбувається інверсія ефекту аномального подавлення. Для інших орієнтацій і по відношенню до H_m має місце зміщення і розширення характерних провалів інтенсивності для даної трьохвильової дифракції. Для спадаючого по експоненційному закону згину атомних площин багатохвильовий ефект рентгеноакустичного резонансу не тільки послаблюється, але і зміщується в короткохвильову область довжин ультразвуку. Показано, що при певному виборі напрямку і можна керувати процесом подавлення інтенсивності тих чи інших дифрагованих хвиль.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ.

1. При дії зовнішньої зосередженої сили на кристал механізми формування муарових і топографічних зображень пружньо-деформованих областей змінюються з переходом до сильних деформацій. Для слабких деформацій зображення в основному відображає функцію локальних розорієнтацій. Для сильних деформацій - її похідну. Це обумовлено тим, що в області сильних деформацій відбувається розмиття вузлів оберненої ґратки і, як наслідок, зменшення віддалі між дисперсійними вітками, що спричиняє перехід від ейконального до міжвіткового характеру розсіяння рентгенівського випромінювання із збільшенням навантаження.

2. Виявлені нові "деформаційні" смуги в сильно деформованому клиновидному аналізаторі LLL-інтерферометра, поява яких обумовлена міжвітковим характером розсіяння рентгенівських променів, період і форма яких залежать від величини прикладеної сили. Зображення сильно неоднорідних полів змі-

шень складаються з кінематичного і динамічного. В області кінематичного зображення виявлені товщинні осциляції інтенсивності динамічного розсіяння.

3. Досліджені закономірності формування інтерферометричних зображень дефектів, які розміщені в різних пластинах трьохкристального інтерферометра. Одержані муарові зображення є результатом сумарної фазової взаємодії зображень дефектів, які знаходяться в усіх компонентах інтерферометра. Прояв взаємодії визначається "потужністю" деформаційних полів дефектів.

4. Механізми формування інтерферометричних і топографічних зображень окремих дефектів в акустично збудженому кристалі визначаються співвідношенням довжини хвилі ультразвуку і екстинкційної довжини, а також величиною амплітуди ультразвукової хвилі, зміна якої у випадку рентгеноакустичного резонансу обумовлює періодичне проходження мінімумів товщинних осциляцій когерентної складової дифрагovanого випромінювання через місце знаходження дефектів. Це забезпечує збільшення розмірів зображень дефектів як для кінематичної, так і для динамічної складових.

5. В умовах рентгеноакустичного резонансу експериментально досліджені амплітудні залежності інтегральної інтенсивності $I(U)$ і її просторовий розподіл $I(x)$ в кристалах, що містять смуги росту і свірлові дефекти. Визначені значення екстинкційної довжини Λ , статичного фактору Дебая-Валлера L , коефіцієнта дифузного поглинання μ_d і рівня деформації кристалічної ґратки ϵ , а також знайдені характерні розміри мікродефектів і їх густина на одиницю об'єму. Встановлено, що в довгохвильовій області ультразвуку контраст від мікродефек-

тів суттєво підсилюється.

6. Теоретично і експериментально досліджено вплив акустичних зміщень на розсіяння рентгенівських променів в трьох-кристальному LLL-інтерферометрі. Виявлено, що найбільші зміни періодів муарових смуг відбуваються при частотах ультразвуку, близьких до резонансної. Зростання амплітуди ультразвуку веде або до збільшення, або до зменшення кута повороту атомних площин відносно початкового значення. Основною причиною максимальних змін періодів муарових смуг є дисперсійний характер залежності екстинкційної довжини від співвідношення λ_s/λ . Показано, що метод рентгенівського муару дозволяє визначити не тільки міру однорідності акустичного хвильового поля, але й оцінити значення його амплітуди локально в кожній точці кристалу.

7. Теоретично досліджено вплив рентгеноакустичної взаємодії на формування контрасту дислокацій. Встановлені механізми формування дифракційних зображень дислокацій різних типів і орієнтацій в залежності від параметрів ультразвукової хвилі. В резонансному випадку ($\lambda_s = \lambda$) відбувається помітне збільшення дислокаційного контрасту відносно фону, а також різноманітна трансформація зображень в залежності від механізмів їх формування. Встановлені закономірності використані для вдосконалення традиційної рентгенівської топографії, а також для розробки нових методів дослідження структурних недосконалостей.

8. Вперше продемонстрована можливість виявлення включень, в умовах рентгеноакустичного резонансу при певних значеннях амплітуди w , які в звичайних умовах на топограмах непомітні. Розміри дифракційного зображення включень, одержані

при $\lambda_g = \lambda$ в точному положенні відбивання, співрозмірні з такими, які можуть бути одержані на схилі кривої гойдання. Досягається це шляхом послаблення когерентної складової розсіяння і підсилення некогерентної. Тип мікродфектів не впливає на фоновий ріст динамічної і кінематичної складових зображення.

9. Числовим рішенням рівнянь Такагі досліджено вплив еквідистантного згину і ультразвукового поля деформацій на багатохвильове розсіяння у випадку трьохвильової $(111, \bar{1}\bar{1}\bar{1})$ Лауе дифракції. Показано, що при орієнтації вектора зміщень паралельно вектору зв'язуючого відбивання, дана трьохвильова конфігурація є більш чутливою до слабких спотворень кристалічної ґратки, ніж двохвильові. Встановлено, що при зміні орієнтації векторів дифракції в площині розсіяння можливі один або два рентгеноакустичні резонанси. Спостерігається зняття заборони на пряму взаємодію дифрагованих (111) і $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ хвиль. Показано, що в короткохвильовій області акустичних довжин хвиль $(\lambda < \lambda_{\text{екс}}^{(111)})$ періоди маятникових осциляцій збільшуються, а в довгохвильовій - зменшуються. В резонансних випадках із збільшенням амплітуди ультразвуку виникають параметричні осциляції інтенсивностей дифрагованих хвиль з періодом, кратним перенормованій екстинкційній довжині.

10. Вперше теоретично досліджено вплив на рентгеноакустичну взаємодію в умовах резонансу еквідистантного згину атомних площин кристалу Ge у випадку трьохвильової дифракції $(111, \bar{1}\bar{1}\bar{1})$. Встановлено, що при орієнтації вектора зміщень $\chi_{\text{H}_2\text{O}}$ з ростом w відбувається інверсія ефекту аномального подовлення інтенсивності дифрагованих хвиль. При наявності в кристалі експоненційно спадаючого поля зміщень багатохвильо-

вий ефект рентгеноакустичного резонансу послаблюється при довільних орієнтаціях вектора u по відношенню до N_m . Підбором напрямків орієнтації u можна керувати процесом подавлення або підсилення тих або інших дифрагованих хвиль.

11. Встановлено, що у випадку квазікомпланарної дифракції (600,351) при дії ультразвуку на кристал відбувається не тільки зменшення інтенсивності багатохвильового піку, але й зміщення його від початкового положення. Обгрунтована перспектива використання багатохвильового ефекту Ренінгера для побудови геометричної теорії багатохвильової тензометрії.

12. В косонесиметричній схемі дифракції на відбивання азимутальним скануванням навколо вектора дифракції реалізується неперервне зменшення екстинкційної довжини до значень порядку декількох десятків ангстрем. Це відкриває нові можливості неруйнуючого дифрактометричного і топографічного пошарового аналізу структурних змін в приповерхневих шарах при зовнішніх діях на поверхню кристалу.

13. Реалізована схема косонесиметричної геометрії дифракції на відбивання в одно- і двохкристальній установці кристалів з подальшим азимутальним скануванням навколо вектора дифракції. Досліджені рел'єф поверхні і структура тонких приповерхневих шарів монокристалів Si, CdTe, InSb після різних видів хіміко-механічної і лазерної обробки. Мінімальні розміри висот нерівностей, які визначаються безпосередньо із топограм, рівні $\sim 2.5 \cdot 10^{-2}$ мкм. Проведений аналіз основних закономірностей формування контрасту від дефектів на поверхні кристалів CdTe і InSb до і після лазерної дії. Обгрунтовані перспективи застосування даного методу топографії та ДКС також у випадку інших дій на поверхню кристалу.

Основні результати дисертації опубліковані

в таких наукових працях:

1. Козьмик В.Д., Раранский Н.Д., Фодчук И.М. Зависимость формы маятниковых полос от расстояния между образцом и пленкой //УФЖ.-1980.-25,№5.-С.852.
2. Кшевечкая М.Л., Раранский Н.Д., Фодчук И.М., Шафранк В.П. Дисперсионные эффекты при многоволновом рассеянии рентгеновских лучей //УФЖ.-1983.-28,№12.-С.1846.
3. Раранский Н.Д., Шафранк В.П., Фодчук И.М. Муаровые изображения полос роста в бездислокационном монокристалле Si //УФЖ.-1985.-30,№1.-С.133.
4. Раранский Н.Д., Шафранк В.П., Фодчук И.М. Рентгеноинтерферометрическое изображение полей деформаций вокруг дислокационных скоплений //Металлофизика.-1985.-7,№5.-С.63.
5. Остапович М.В., Фодчук И.М. Рассеяние плоских рентгеновских волн при трехволновой дифракции (111,Т11) в германии с эквидистантно изогнутыми отражающими плоскостями //УФЖ.-1985.-30,№2.-С.310.
6. Раранский Н.Д., Остапович М.В., Фодчук И.М., Остапович В.Н. Трехволновые маятниковые осцилляции в кристаллах с эквидистантно изогнутыми отражающими плоскостями.//УФЖ.-1986.-31,№7.-С.1080.
7. Раранский Н.Д., Фодчук И.М., Струк Я.М., Новиков С.Н. Трехволновая (111,Т11) дифракция рентгеновских волн в кристалле Ge с периодическим полем смещений //Металлофизика.-1988.-10,№5.-С.59.
8. Раранский Н.Д., Фодчук И.М., Струк Я.М., Сергеев В.Н., Новиков С.Н. Аномальное прохождение рентгеновских лучей в

- случае трехволновой (111, T11) дифракции на кристалле с акустическим полем смещений //Кристаллография.-1989.-34, вып.5.-С.1563.
9. Кшевещкий С.А., Стецко Ю.П., Фодчук И.М., Мельничук И.В., Полянко В.С.. Косонесимметричная рентгеновская топография приповерхностных слоев монокристаллов //УФЖ.-1990.-35, №3.-С.444.
10. Fodchuk I.M., Raransky N.D., Struk Ya.M., Sergeev V.N., Novikov S.N. X-Ray Acoustic effects in Multiple-beam Complanar Diffraction //Acta crystallogr. A.-1990.-46, Sup.-С.435.
11. Raransky N.D., Struk Ya.M., Fodchuk I.M., Shafranuk V.P. A Study of Crystal Defects by X-Ray Moire Pattern Method //Acta crystallogr. A.-1990.-46, Sup.-С.424.
12. Щербак В.М., Фодчук И.М., Тихонова В.М. Примесные дефекты структуры в монокристаллах CdTe //Кристаллография.-1991.-36, вып.4.-С.1521.
13. Фодчук И.М., Кшевещкий О.С. Рентгенотопографические исследования рельефа поверхности и дефектов структуры тонких приповерхностных слоев монокристаллов InSb и CdTe //Металлофизика.-1992.-14, №5.-С.57.
14. Раранский Н.Д., Фодчук И.М., Сергеев В.Н., Гимчинский А.Г., Струк Я.М., Новиков С.Н., Шафранюк В.П. Влияние ультразвуковых деформаций на муаровые картины //Металлофизика.-1993.-15, №1.-С.47.
15. Раранский Н.Д., Фодчук И.М., Сергеев В.Н., Гимчинский А.Г., Борча М.Д. Влияние ультразвуковых деформаций на многоволновую дифракцию в схеме Реннингера //Металлофизика.-1993.-15, №2.-С.97.

16. Раранский Н.Д., Фодчук И.М., Новиков С.Н., Коровянюк О.Ж. Влияние ультразвука на контраст дислокаций //Металлофизика.-1993.-16, №2.-С.45.
17. Raransky A.N., Struk J.M., Fodchuk I.M., Raransky A.M. Solution of X-Ray Diffraction Inverse Problems in Optics //Proc. SPIE.- Bellingham, 1993.-P.37.
18. Раранский Н.Д., Фодчук И.М., Новиков С.Н. Влияние ультразвуковых деформаций на формирование изображения дислокации параллельной поверхностям кристалла //Металлофизика.-1994.-16, №4.-С.27.
19. Кшевецкий С.А., Раранский А.Н., Фодчук И.М. Рентгеновская дифрактометрия приповерхностных слоев монокристаллов в коснесимметричной схеме дифракции //Металлофизика.-1994.-16, №4.-С.66.
20. Раранский Н.Д., Фодчук И.М., Новиков С.Н., Коровянюк О.Ж., Гимчинский А.Г. Особенности рассеяния рентгеновских лучей в акустически возбужденном кристалле, содержащем микродефекты //Металлофизика.-1994.-16, №4.-С.33.
21. Раранский Н.Д., Остапович М.В., Фодчук И.М. Многоволновые маятниковые осцилляции в кристаллах с эквидистантно изогнутыми отражающими плоскостями /Черновицкий гос. ун-т.- Черновцы, 1984.- Деп. в УкрНИНТИ, 10.10.84. №1691 Ук-84 Деп.
23. Раранский Н.Д., Фодчук И.М., Бояджан Г.С. Маятниковые полюсы в упруго-деформированных монокристаллах /Черновицкий гос. ун-т.- Черновцы, 1985.- Деп. в УкрНИНТИ, 22.07.85. №1458 Ук-85 Деп.
24. Раранский Н.Д., Фодчук И.М., Шафранк В.П. Рентгенопографические и интерферометрические изображения полей

- упругих деформаций, возникающих при действии внешних сосредоточенных сил на Si /Черновицкий гос. ун-т.- Черновцы, 1985.- Деп. в УкрНИИТИ, 15.04.85. №1432 Ук-84 Деп.
25. Раранский Н.Д., Фодчук И.М., Струк Я.М. Трехволновая дифракция ($T_{11,200}$) в крист. Ge с эквидистантно изогнутыми плоскостями /Ред. журн. УФЖ.- Киев, 1987.- Деп. в ВИНТИ 06.10.87. №7142-В87.
26. Раранский Н.Д., Фодчук И.М., Струк Я.М., Новиков С.Н. Многоволновая дифракция рентгеновских лучей в кристалле с акустическим полем смещения /Ред. журн. "Известия вузов"- Томск, 1988.- Деп. в ВИНТИ 24.06.88. №5012-В88.
27. Раранский Н.Д., Струк Я.М., Фодчук И.М. Трехволновые маятниковые полосы в Ge в случае одномерных искажений // Межвузовский сборник научных трудов. "Физика".- Ереван, ЕрГУ, 1987, №8-9.-С.126.
28. Раранский Н.Д., Струк Я.М., Фодчук И.М., Шафраник В.П. Определение локальных разориентаций атомных плоскостей методом рентгеновского дифракционного муара //Межвузовский сборник научных трудов. "Физика".- Ереван, ЕрГУ, 1987, №8-9.-С.153.
29. Raransky N.D., Struk Ya.M., Fodchuk I.M., Shafranuk V.P. Interference effects in wear and strong distortion cases in X-Ray interferometr //Collected abstracts Twelfth European Crystallographic meeting.- Moskow, 1989.-3.-94.
30. Fodchuk I.M., Raransky N.D., Struk Ya. M., Sergeev V.N. X-Ray multiple diffraction in crystals with one dimensional displacement field //Collected abstracts Twelfth European Crystallographic meeting.- Moskow, 1989.-3.-42.

Фодчук И.М. "Двух- и многоволновые рентгеноакустические эффекты в топографии и интерферометрии реальных кристаллов".

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела, ин-т Металлофизики АН Украины, Киев, 1994.

Защищается 30 научных работ, которые содержат экспериментальные и теоретические исследования рентгенодифракционных эффектов в акустически возбужденных кристаллах, содержащих дефекты структуры. Установлены механизмы влияния параметров ультразвуковой стоячей волны на формирование рентгеноинтерферометрического и топографического изображений отдельных дислокаций и микродефектов. Показано, что в условиях рентгеноакустического резонанса происходит существенная трансформация изображения дефектов со значительным усилением их контраста. Это использовано для разработки новых высокоразрешающих топографических и дифрактометрических методов структурной диагностики кристаллов.

Fodchuk I.M. Two- and multiwave X-ray acoustic effects in real crystals topography and interferometry.

The phys.-math. doctor high degree thesis is presented. The spec. 01.04.07 - solid state physics, Metallophysics Institute of Ukraine Academy of Science, Kiev, 1994.

30 papers are presented, which contains experimental and theoretical researches on X-ray acoustic effects in acoustically excited crystals with different structure defects. The mechanisms of ultrasound stagnant wave influence on the X-ray topography image formation for single dislocations and microdefects are obtained. It is shown that essential transformation of the defects images with considerable contrast strengthening occurs under the X-ray-acoustic resonance condition. This has been used for creation of the new high resolution topography and diffractometry methods of the crystal structure diagnostics.

Ключові слова: рентгенівські промені, дифракція, рентгеноакустичний резонанс, екстинкційна довжина, дефекти.

Підписано до друку 22.09.1994р.
Формат 60x84/16. Папір друкерський 2.
Офсетний друк. Умов.друк. аркушів 2.
Тираж 100 примірників.

AB 30.964

AB 30.964