

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ

СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВЧЕНА РАДА К.016.25.01

на правах рукопису

ГРИГОРЬЄВ ДАНИЛО ОЛЕГОВИЧ

**РЕНТГЕНОАКУСТИЧНА ВЗАЄМОДІЯ В
МОНОКРИСТАЛІЧНОМУ КРЕМНІІ РІЗНОГО
СТУПЕНЯ СТРУКТУРНОЇ ДОСКОНАЛОСТІ**

01.04.10 - фізика напівпровідників та діелектриків

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеню
кандидата фізико-математичних наук

КИЇВ - 1994

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана в Інституті фізики напівпровідників
АН України, м.Київ.

Наукові керівники:

доктор фізико-математичних наук,
професор Даценко Леонід Іванович,

доктор фізико-математичних наук
Хрупа Валерій Іванович

Офіційні опоненти:

Член-кореспондент АН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор Мільман Юлій Вікторович

доктор фізико-математичних наук,
професор Тхорик Юрій Олександрович

Провідна організація: Інститут металофізики АН України.

Захист відбудеться "20" сравно 1994 р. о 14¹⁵
на засіданні спеціалізованої вченої ради К.016.25.01 при
Інституті фізики напівпровідників за адресою:
252028, Київ, проспект Науки, 45.

Відгуки на автореферат у двох примірниках, засвідчені
печаткою, прохання надсилати за вказаною адресою на ім'я
вченого секретаря спеціалізованої ради.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту.

Автореферат розіслано "18" квітня 1994 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради

Беляев О.Є.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00802251 (1)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми

При вирішенні задачі структурної діагностики важливого значення набувають рентгенодифрактометричні методи, що базуються на вивченні кількісних характеристик дифрагованого випромінювання.

В останній час досягнуто значний прогрес у технології вирощування монокристалів бездислокаційного кремнію, структура яких лише в незначній мірі відрізняється від ідеальної. У зв'язку з цим виникає необхідність у розвитку рентгенодифракційних методів діагностики структурної досконалості таких об'єктів.

Теоретичною базою згаданих методів є динамічна теорія дифракції випромінювання на недосконалих кристалах. В даний час ця теорія знаходиться у процесі розвитку. Особливо складним для аналізу є випадок комбінованого деформаційного поля довільного типу. Тому накопичення і систематизація експериментальних даних про процеси дифракції рентгенівських променів (РП) на кристалах, що містять дефекти різної природи, становить науковий і практичний інтерес. Зокрема, така інформація може бути використана при:

-проведенні аналізу коректності та меж застосування математичних виразів, що описують зв'язок дифракційних параметрів з характеристиками дефектної структури;

-оптимізації дифракційних умов з метою розширення функціональних можливостей діагностичних методів

-створенні нових методик структурної діагностики.

Окремий інтерес становлять рентгенодифракційні дослідження в умовах акустичного збудження кристала ультразвуковими коливаннями (УЗК). З одного боку, УЗК можуть бути зручним засобом моделювання реальної, досить складної, дефектної структури. З іншого боку, безпосереднє використання ультразвукового збудження дозволило суттєво розширити можливості методів рентгенівської дифрактометрії, потенціал яких ще далеко не вичерпаний.

Отже, виходячи зі сказаного, можна зробити висновок про те, що представлена робота присвячена актуальній проблемі.

Метою роботи є експериментальне дослідження закономірностей динамічної дифракції РП на кристалах, що містять статичні та акустичні деформації структури, зокрема:

-Вивчення впливу статичних деформацій різного типу, спричинених дефектами, на характер залежності інтегральної відбивної здатності (ІВЗ) та її компонент від порядку рефлекса в широкому діапазоні зміни ступеню структурної досконалості і рівня поглинання РП з метою одержання інформації про характер динамічної дифракції в реальних кристалах і перевірки теоретичних положень.

-Дослідження закономірностей дифракції РП в реальних кристалах в умовах акустичного збудження з метою встановлення механізмів впливу дефектів на рентгеноакустичну взаємодію.

-В створенні на основі одержаних даних високочутливих методів структурної діагностики майже досконалих кристалів.

НАУКОВА НОВИЗНА РОБОТИ

Наукова новизна роботи визначається сукупністю результатів, сформульованих у висновках до дисертації і приведених в кінці автореферату. До основних суттєво нових результатів дисертаційної роботи можна віднести наступні:

1. Експериментально встановлений і вивчений вплив порядку відбиття на характер товщинних залежностей повної відбивної здатності реального кристала, а також її складових. Показана можливість переходу від увігнутої до опуклої товщинної залежності ІВЗ недосконалого кристалу зі збільшенням вектора дифракції за рахунок дифузної компоненти розсіювання.

2. Експериментально підтверджені аналітичні вирази динамічної теорії дифракції РП на акустично збудженому кристалі, яка послідовно враховує ефекти поглинання випромінювання.

3. Експериментально показано, що величина відносного приросту ІВЗ, який виникає при збудженні УЗК в слабопоглинаючому реальному кристалі, різко зростає зі збільшенням порядку відбиття, але падає з ростом рівня статичних деформацій структури.

4. Встановлено, що збудження в недосконалому кристалі слабких УЗК при дифракції РП в режимі ефекту Бормана може призвести до аномального росту інтенсивності рефлексу.

5. Вперше показана можливість моделювання статичної дефектної структури кристалу в рентгеноакустичному експерименті за допомогою двох незалежних джерел УЗК.

6. Виявлена можливість визначення інтегральних характеристик структурної досконалості бездислокаційних кристалів Si, що містять слабкі комбіновані (і локалізовані, і розподілені) деформації.

7. Показано, що в бездислокаційних кристалах Si, вирощених методами Чохральського і бестигельного зонного плавлення, існує певна кореляція між варіаціями структурної досконалості і

однорідності та величиною і розподілом питомого опору після технологічного відпалу, що пов'язане з поведінкою твердого розчину кисню при високих температурах.

НАУКОВЕ І ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ РОБОТИ

Одержані в роботі нові дані розвивають фізичні уявлення про механізми дифракційних і рентгеноакустичних взаємодій в недосконалому кристалі, а також сприяють розширенню функціональних можливостей наявних і створенню нових методів кількісного дослідження ступеню структурної досконалості монокристалічних матеріалів. Розроблені в дисертації дифрактометричні методи структурної діагностики кристалів дозволяють одержувати кількісну інформацію як про ростові недосконалості, що виникають на ранніх стадіях дефектоутворення (кластерів точкових дефектів, передвиділень нових фаз, дислокацій, розподілених деформацій), так і про технологічні дефекти, що генеруються в процесі виготовлення приладів.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ, ЩО ВІНОСЯТЬСЯ НА ЗАХИСТ.

1. В кристалі з мікрodefekтами можливий перехід від вігнутої до опуклої товщинної залежності ІВЗ зі збільшенням порядку відбиття, обумовлений внеском дифузної компоненти розсіювання.

2. Величина відносного приросту ІВЗ в акустично збудженому слабопоглинаючому кристалі зростає зі збільшенням порядку відбиття, але падає з ростом рівня статичних деформацій.

Збудження в сильнопоглинаючому недосконалому кристалі слабких УЗК може призвести до аномального росту інтенсивності рефлекса.

3. Аналіз профілів просторового розподілу інтенсивності дифрагованих РП в умовах акустичного збудження зразка дозволяє виявити домінуючий тип деформацій кристалічної ґратки і визначити інтегральні характеристики дефектної структури у випадку комбінованих полів деформацій.

4. На захист виноситься сукупність результатів експериментальних досліджень і чисельних розрахунків по перевірці формул оригінальної динамічної теорії дифракції РП на акустично збуджених поглинаючих кристалах, що описують залежність інтенсивності рефлексу від амплітуди УЗК, а також просторовий розподіл інтенсивності дифракційного максимуму.

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ

Матеріали дисертації доповідались і обговорювались на таких конференціях, нарадах і семінарах: 3-й Всесоюзній нараді по міжвузівській комплексній програмі "Рентген" (Чернівці, 1989), 4-й Всесоюзній нараді з когерентної взаємодії випромінення з речовиною

(Юрмала, 1989), 2-й конференції по динамічному розсіюванню рентгенівських променів в кристалах з динамічними і статичними викривленнями (Кацевелі, 1990), Міжнародна школа-семинар молодих дослідників (Алушта, 1992), 1-й Міжнародній конференції "Фізика на Україні" (Київ, 1993), а також обговорювались на наукових семінарах Інституту фізики напівпровідників АН України.

ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

Результати дисертаційної роботи були використані у госпдогвірній роботі N232/18-90 "Усовершенствование методики контроля структурного совершенства и деформации в кремниевых пластинах", яка проводилась спільно інститутом Фізики напівпровідників АН України і концерном "Родон", м.Івано-Франківськ.

ОСОБИСТІЙ ВНЕСОК АВТОРА

В дисертаційній роботі узагальнені результати експериментальних досліджень, виконаних дисертантом особисто, в рамках завдань, сформульованих науковими керівниками. Автор безпосередньо виконав весь обсяг обчислень на ЕОМ. Оскільки дисертант приймав активну участь у написанні, оформленні і обговоренні статей, він є повноправним членом авторського колективу в усіх матеріалах, надрукованих у співавторстві.

ПУБЛІКАЦІЇ

По темі дисертації опубліковано 12 наукових робіт.

СТРУКТУРА І ОБ'ЄМ ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертація загальним об'ємом 147 сторінок складається з 5 глав, вступу і заключної частини і вміщує в себе 25 рисунків, 9 таблиць та список літератури з 156 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі обґрунтована актуальність обраної теми досліджень, сформульовані мета і основні завдання роботи, її наукова новизна, практичне значення одержаних результатів, подані основні положення, що виносяться на захист, а також відомості про апробацію.

В першому розділі зроблено огляд літератури по темі дисертації. Проаналізовані питання, пов'язані з механізмами впливу дефектів різного типу (локалізованих, розподілених, а також порушеного поверхневого шару) на закономірності розсіювання короткохвильових випромінювань, зокрема, в умовах акустичного збудження кристалу. При цьому робився акцент на можливостях використання дифракційних ефектів для вирішення діагностичних задач. Аналіз літературних даних підтвердив актуальність поставленої задачі.

Другий розділ-методичний, присвячений апаратурним і методичним особливостям дифрактометричних вимірювань, а також деяким технічним аспектам рентгеноакустичних експериментів.

В третьому розділі наводяться результати експериментів по дослідженню впливу статичних деформацій на ІВЗ кристалу, а також на її когерентну та дифузну складові.

В першому параграфі, із залученням даних рентгенівської топографії, вивчалась структура порушеного приповерхневого шару (ППШ), а також розглядались механізми впливу ППШ на інтегральну відбивну здатність (ІВЗ) сильнопоглинаючого кристалу Si. Показано, що шліфування поверхні кристалу вільним абразивом М60 призводить до утворення відносно тонкої (30-35 мкм) зони пластичної деформації, а також значно більшої області неоднорідних пружних макродеформацій, які виникають на приповерхневих концентраторах напружень, протяжністю до 500 мкм. Виявлено значне (до 30%) збільшення ІВЗ в умовах високого рівня поглинання у кристалі з ППШ, порівняно з ідеальним кристалом. При цьому вказаний ефект виразніше виявляється з підвищенням порядку відбиття. Хімічне витравлення незначної (3-7 мкм) найбільш порушеної частини ППШ призводить до релаксації пружних деформацій, що супроводжується суттєвим зменшенням ІВЗ. Одержані результати дозволяють зробити висновок, що спостережуване у товстому кристалі з ППШ збільшення ІВЗ, в цілому, обумовлене дифракційним розсіюванням на протяжній по глибині пружнодеформованій області ґратки певної додаткової частини

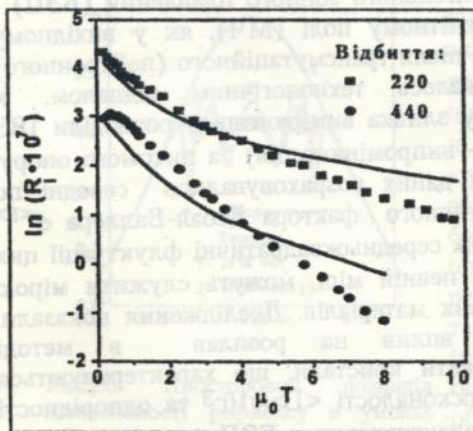


Рис.1. Товщинні залежності ІВЗ R_i для недосконалого (точки) і ідеального (криві) кристалів Si. Мо $K\alpha_1$ -випромінювання.

розбіжних рентгенівських променів падаючого на кристал випромінювання, які після взаємодії з деформованими ділянками розповсюджуються далі у динамічному режимі.

В другому параграфі вивчались закономірності поведінки ІВЗ (R_i), а також її компонент та інтегральних параметрів структурної досконалості, при варіюванні товщини T недосконалого кристалу та порядку Лаує-дифракції. Дослідження проводились на зразку бездислокаційного Si з кон-

центрацією атомарного кисню $N_O=2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, який після відпалу (6.5 год., 1100°C) містив досить великі (5-10 мкм) мікрodefekти, з використанням двокристалного спектрометра (рефлекси 220 та 440, $\text{MoK}\alpha_1$ -випромінювання). Рівень поглинання при вимірюваннях ІВЗ змінювався у межах $\mu_0 T=0.2-10$, μ_0 -коефіцієнт фотоелектричного поглинання. Виходячи з величин $R_I(T)$, були визначені дифракційні параметри структурної досконалості L (статичний фактор Дебая-Валлера) та μ_d -коефіцієнт додаткових втрат енергії РП при дифузному розсіюванні на дефектах. Це дозволило розрахувати залежності $R_B(T)$ та $R_D(T)$, які описують динаміку внесків когерентної та дифузної складових у повну R_I . Встановлено, що з ростом порядку дифракції, поряд із зменшенням абсолютних значень ІВЗ, відбувається підвищення чутливості ІВЗ до пошкоджень ґратки в усьому діапазоні змін T , що проявляється у збільшенні відносної зміни ІВЗ порівняно з ІВЗ досконалиго кристалу. Експериментальні дані вказують на зміну характеру товщинної залежності R_I від увігнутої до опуклої зі збільшенням порядку відбиття в умовах малих рівнів поглинання (рис.1), що свідчить про зростання вагомості внеску R_D у повну ІВЗ. Зауважимо, що при високому рівні поглинання РП ($\mu T=8$) внесок дифузної компоненти у повну ІВЗ для рефлекса 440 досягав в наших умовах 70%, при цьому спостерігався ефект динамічного розповсюдження дифузної складової, який проявлявся у поступовій стабілізації відношення R_D/R_B з ростом T і був особливо помітним на високих рефлексах.

Третій параграф присвячено порівняльному аналізу структурних та електрофізичних властивостей кристалів кремнію, що були вирощені методами бестигельного зонного плавлення (БЗП) і методом Чохральського у магнітному полі (МЧ), як у вихідному після вирощування стані, так і після трансмутаційного (нейтронного) легування, яке супроводжувалось технологічним відпалом. У кожному випадку по перерізу зливка вимірювались розподіли ІВЗ (рефлекси 440 та 660, $\text{MoK}\alpha_1$ - випромінювання) та питомого опору. На основі експериментальних даних розраховувались середні по діаметру зливка значення статичного фактора Дебая-Валлера $e^{<L>}$ та питомого опору $\langle\rho\rangle$, а також середньоквадратичні флуктуації цих величин σ_L та σ_ρ . Останні, в певній мірі, можуть служити мірою однородності напівпровідникових матеріалів. Дослідження показали, що магнетогідродинамічний вплив на розплав в методі Чохральського дозволяє одержати кристали, що характеризуються високим рівнем структурної досконалості $\langle L \rangle \approx 10^{-3}$ та однорідності $\sigma_L \approx 7\%$, які відповідають цим характеристикам БЗП-матеріала. Рівень же макропошкоджень, пов'язаний імовірно з неоднорідно розподіленими домішками, і в першу чергу з киснем, в МЧ-Si є,

однак, вищим, ніж в БЗП-Si. Нейтроннолегований БЗП-Si характеризується високим рівнем структурної однорідності та вельми однорідним розподілом питомого опору. В той же час, нейтронне легування МЧ-Si може призводити до втрати вихідної структурної однорідності, а також до зниження середнього рівня структурної досконалості завдяки розпаду пересиченого твердого розчину кисню внаслідок посттрансмутаційного відпалу. Кореляція рентгенодифракційних даних та результатів вимірювання питомого опору дозволяє пояснити факт неоднорідної перекомпенсації МЧ-зразка присутністю термодонорів та термоакцепторів кисневого походження, що утворились в процесі посттрансмутаційного відпалу.

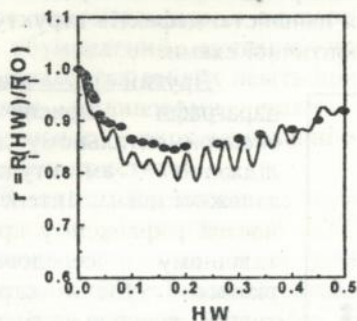


Рис.2.а. Залежність відносної відбивної здатності $\Gamma = R_1(HW)/R_1(0)$ від амплітуди W УЗК. H -вектор дифракції.

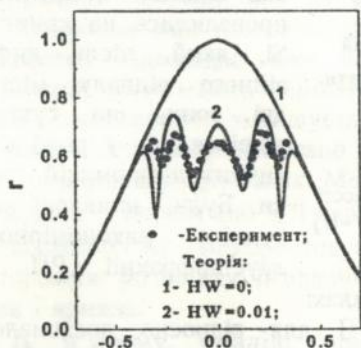


Рис.2.б. Просторовий розподіл інтенсивності рефлексу в умовах РАР. 220-відбиття, $AgK\alpha_1$.

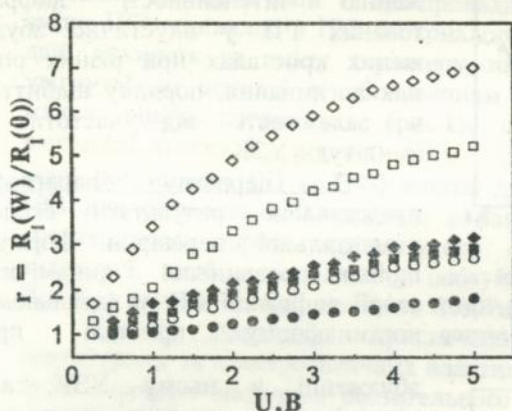
Четвертий розділ

присвячений експериментальному дослідженню інтенсивності дифрагованих РП у акустично збуджених кристалах при різних рівнях поглинання, порядку відбиття, в залежності від частоти і амплітуди УЗК.

В першому параграфі представлено результати експериментальної перевірки формул теорії дифракції РП на ідеальному поглинаючому кристалі при

збудженні у ньому УЗК, які відповідають умовам рентгеноакустичного резонансу $\lambda_S \approx \Lambda$ (λ_S -довжина УЗ-хвилі, Λ -екстинкційна довжина). Основні аналітичні вирази означеної теорії стосуються розподілу інтенсивності в оберненому просторі, але можуть бути трансформовані у вирази, які описують залежність інтенсивності рефлексу від амплітуди УЗК, а також просторовий розподіл інтенсивності дифрагованих РП по основі дельти Бормана. Це обумовило напрямки експериментальних досліджень. Залежності ІВЗ від амплітуди УЗК вивчалися

для рефлексів 220 і 440 ($AgK\alpha_1$ -випромінювання) в умовах проміжних рівнів поглинання ($\mu T=1.5$), коли такі графіки мають складний немонотонний характер (Рис.2.а.). На Рис.2.б. представлені результати досліджень просторового розподілу інтенсивності по основі дельти Бормана в умовах високого рівня поглинання ($\mu T=7.5$). Параметр P характеризує віддалення від центру дельти Бормана. Дві пари характерних провалів виникають, коли довжина хвилі УЗК трохи (на проценти) перевищує Λ . Вони обумовлені селективним поглинанням двох пар блохівських хвиль (відповідно, для σ - і π -поляризованого випромінювання), для яких локально виконуються умова $\lambda_s = \Lambda$. Як легко бачити, в обох випадках спостерігається досить добре співпадіння результатів експериментів і теорії. Деякі розбіжності пояснюються наявністю дефектів структури і недостатньою досконалістю рентгенооптичної схеми.



досконалий		недосконалий	
кристал, відбиття:		кристал, відбиття:	
○	440	●	440
□	660	■	660
◇	880	◆	880

Рис.3. Залежності відносної відбивної здатності $r(W)=R_i(W)/R_i(0)$ від амплітуди УЗК $W (W-U)$ для Si різної досконалості. $MoK\alpha_1$ -лінія.

акустично збуджених реальних кристалах:

-В умовах слабого поглинання РП для відносно досконого кристалу ступінь впливу акустичних деформацій на відбивну здатність кристалу суттєво посилюється з ростом порядку рефлекса, що проявляється у значному збільшенні відносного приросту ІВЗ акустично збудженого кристалу $r(W)=R_i(W)/R_i(0)$ (Рис.3.).

Другий і третій параграфи присвячені експериментальному дослідженню амплітудних залежностей інтенсивностей рефлексів у кристалічному середовищі різного ступеня структурної досконалості при варіюванні рівня поглинання і порядку відбиття. Експерименти в умовах слабого поглинання проводились на кристалі Si, який, після дифузійного відпалу містив дві зони, що суттєво відрізнялись у рівні статичних деформацій ґратки. Були виявлені наступні закономірності лауе-дифракції РП на

-При збільшенні рівня статичних деформацій ці закономірності нівелюються. В цьому випадку для рефлексів високих порядків яскраво виражений ефект втрати чутливості відбивної здатності до рівня УЗ збудження, у порівнянні з досконалим кристалом. Ефект обумовлений різким зменшенням внеску в інтенсивність дифракційного максимуму когерентної компоненти розсіювання РП, яка, головним чином, відповідальна за зміну відбивної здатності кристалу в присутності УЗК (Рис.3).

В більш товстому ($\mu T \approx 5$) кристалі Si, який містив ростові дислокації, на рефлексі 220 ($AgK\alpha_1$ -випромінювання) спостерігалось звичайне зменшення відбивної здатності з ростом амплітуди УЗК. Але з переходом до рефлекса 440 залежність $\Gamma(W)$ ставала немонотонною, з яскраво вираженою ділянкою росту. Цей факт обумовлений сильним пригніченням ефекту Бормана на недосконаластях ґратки навіть при відсутності УЗК. За цих обставин найбільш впливовими стають механізми росту інтенсивності дифрагованого випромінювання, притаманні тонким акустично збудженим кристалом.

В четвертому параграфі проводились дослідження амплітудних залежностей інтенсивності $I(W)$ дифрагованих РП в акустично збуджених кристалах Si в умовах РАР при проміжних рівнях поглинання РП. Використовувалось гальміне ($\lambda = 0.4 \text{ \AA}$) випромінювання, рефлекс 220. При цьому за допомогою незалежного джерела УЗК моделювалась випадки розподілених ($\lambda_s > \Lambda$) та локалізованих ($\lambda_s < \Lambda$) деформацій кристалічної ґратки. Щоб звести до мінімуму вплив власних структурних недосконалостей, експерименти проводились на кристалі, вирощеному за методом БЗП. Одержані дані показали, що загальний характер амплітудних залежностей відповідає вже відомому для випадків статичних деформацій: вони мають немонотонний характер, причому глибина провалів інтенсивності зменшується з ростом рівня недосконалості. У ході роботи було запропоновано новий метод визначення амплітуди УЗК, збуджених у кристалах. Метод базується на визначенні зміни величини Λ у порівнянні з її значенням для ідеального кристалу Λ^P при відомому λ_s . Використовується методика аналізу профілів просторового розподілу інтенсивності дифрагованих РП по основі дельти Бормана.

В п'ятому розділі приводяться результати досліджень структурної досконалості бездислокаційних кристалів Si, вирощених різними методами, за допомогою аналізу профілів просторового розподілу інтенсивності дифрагованих РП по основі дельти Бормана в умовах РАР.

Проводилось вивчення залежностей відстані $\Delta x(v_s)$ між провалами селективного поглинання (аналогічним тим, що представлені на рис.2.6.) від частоти УЗК на рефлексах 220 і 440, для σ -компоненти $\text{MoK}\alpha_1$ -випромінювання. Одержані дані використовувались для синтезу дисперсійної поверхні динамічної дифракції недосконалого кристалу і визначення величини Λ , що дозволяє, на основі співставлення значень Λ і Λ_p (для ідеального кристалу), визначити домінуючий тип дефектів для діючого відбиття.

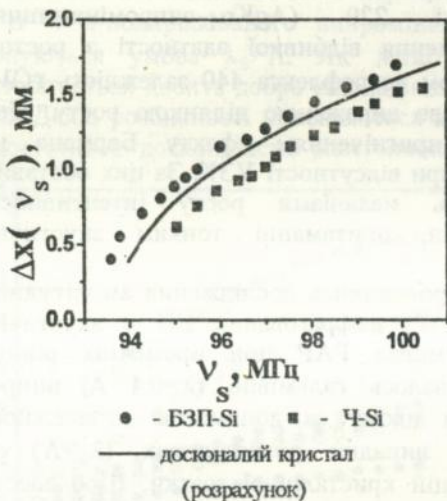


Рис.4. Залежності $\Delta x(v_s)$ для кристалів Si, вирощених різними методами. Відбиття 440, $\text{MoK}\alpha_1$ -випромінювання.

терним для дефектів типу дрібних кластерів.

У випадку Ч-Si реалізувалась протилежна ситуація: Λ стало меншим від Λ_p , що вказує на домінуючий, за даних умов, характер розподілених деформацій в даному зразку з підвищенням порядку відбиття. Одержані дані свідчать, що в кристалах Si у вихідному стані вплив макродеформацій на дифракційні процеси може бути значним, і навіть переважним, а тому застосування традиційних методів структурної діагностики для визначення характеристик мікродофектів без врахування даних про характер полів макродеформацій може призвести до істотних похибок.

Це обумовило проведення серії експериментів по визначенню рівня макродеформацій ϵ у зразках Si, вирощених методом Чохральського. Вимірювання ϵ базується на визначенні ефективної ам-

Дослідження зразків монокристалічного Si, у вихідному після вирощування за методами БЗП і Чохральського (Ч-Si) стані, показали, що на рефлексі 220 у БЗП-Si домінують мікродофекти ($\Lambda > \Lambda_p$), в той час як для Ч-Si спостерігалось майже повне співпадіння Λ і Λ_p . Проте вимірювання ІВЗ показало, що у випадку Ч-Si кристалічна структура не є досконалою (Ri була суттєво меншою від ідеальної). На рефлексі 440 (Рис.4.) було виявлене наступне:

-для БЗП-Si відхилення Λ від Λ_p зросло, причому пропорційно H^2 (H-вектор дифракції), що є харак-

плітуди міграції точок збудження по дисперсійній поверхні, що має місце при наявності в розсіюючому об'ємі розподілених деформацій, по ефекту розмиття провалу селективного поглинання РП в умовах РАР. Метод дозволяє вимірювати досить малі $\approx 1 \cdot 10^{-7}$ рівні розподілених деформацій. Виявилось, що в таких об'єктах значення ϵ може змінюватись в досить широких межах: від $\approx 0,2 \cdot 10^{-6}$ в бездислокаційних високодосконалих кристалах у вихідному стані до $\approx 2 \cdot 10^{-6}$ у кристалах з дислокаціями чи ППШ.

Для визначення параметрів структурної досконалості кристалів з комбінованими полями деформацій було запропоновано феноменологічний підхід, який базується на експериментальному визначенні екстинкційної довжини для серії рефлексів, а також рівня макродеформацій ϵ . Порівняння величин Λ з Λ_p дозволяє, при використанні даних для трьох відбиттів, шляхом чисельного розв'язування системи рівнянь, визначити статичний фактор Дебая-Валлера L , закон $L(N)$ для різних рефлексів (це дозволяє встановити тип мікродфектів), а також ефективний період змінного поля макродеформацій λ_m .

Вказаний підхід було апробовано на кристалах БЗП-Si і Ч-Si у вихідному стані. В БЗП-Si спостерігався незначний ($< 10^{-7}$) рівень макродеформацій, а визначена величина $L = 4,3 \cdot 10^{-3}$ (відбиття 440, $MoK\alpha_1$ -випромінювання) знаходилась у доброму узгодженні з результатами незалежних досліджень (методи ІВЗ в геометрії Брега і Лауе). В Ч-Si результати були такими: $\epsilon = 3 \cdot 10^{-7}$; $\lambda_m \approx 200$ мкм; $L_{440} = 7,6 \cdot 10^{-3}$, причому $L \sim N^2$ (дрібні кластери); що відповідає відомим літературним даним.

Таким чином, на прикладі кристалів, вирощених за методами Чохральського і БЗП, показано, що аналіз величин Λ і інтегральних відбиваючих здатностей кристалу для серії рефлексів, з залученням даних про рівень макродеформації, підвищує достовірність дифрактометричних даних, і дозволяє в кристалах з сильно розвиненою структурою макродеформаційних полів визначити комплекс інтегральних характеристик локалізованих і розподілених дефектів.

В заключній частині сформульовані основні результати і висновки, наведені нижче:

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що збільшення ІВЗ ΔR_i в товстому кристалі Si з пошкодженою при абразивній обробці вхідною гранню, у порівнянні з досконалим зразком, обумовлено додатковою компонентою розсіювання, яка виникає в області пружних деформацій кристалічної матриці. Аналогічно випадку дифракції на тонкому кристалі з ППШ, значення ΔR_i збільшується з ростом порядку відбиття.

2. Показано, що сумарна протяжність порушеного шару, виникаючого при грубій абразивній обробці кристалів Si, досягає у глибину 500 мкм. При цьому основна його частина становить зону неоднорідних розповсюджених у глибину пружних деформацій, виникаючих на концентраторах напружень, які швидко релаксують при стравлюванні тонкого приповерхневого шару глибиною декілька мікрон.

3. Експериментально встановлено, що в кристалах Si, які містять мікрodefekти, зі збільшенням порядку відбиття можливий перехід від уєггнутої до опуклої товщинної залежності ІВЗ. Факт такого переходу обумовлений збільшенням внеску дифузної складової розсіювання і знаходиться у згоді з основними висновками щойно розвиненої динамічної теорії розсіювання випромінювання кристалічним середовищем з однорідно розподіленими дефектами.

4. При дифракції РП в режимі ефекту Бормана відносний внесок в ІВЗ дифузної складової розсіювання суттєво зростає зі збільшенням як порядку відбиття, так і розміру γ мікрodefekтів. Так, для рефлекса 440 ($Mo K\alpha_1$ -випромінювання, $\mu T=8$) внесок дифузної компоненти у повну ІВЗ при $\gamma=5$ мкм досягає 70%.

5. Виконана експериментальна перевірка формул оригінальної теорії динамічного розсіювання РП на акустично збудженому кристалі, яка послідовно враховує ефекти поглинання випромінювання. Експериментально обгрунтовані межі застосування одержаних виразів. Показана коректність аналітичних виразів, які описують залежність інтенсивності дифрагованих РП від амплітуди УЗК, а також розподіл π по основі дельти Бормана.

6. Експериментально показано, що величина відносного приросту ІВЗ, який виникає при збудженні УЗК в слабопоглинаючому реальному кристалі різко зростає зі збільшенням порядку відбиття. Але з ростом рівня статичних деформацій відбувається послаблення цього ефекту, аж до втрати чутливості ІВЗ до амплітуди УЗК.

7. Знайдено, що при дифракції РП в режимі ефекту Бормана збудження в недосконалomu кристалі слабких УЗК може призвести не до звичайного зменшення, а до зростання інтенсивності рефлекса. Цей ефект спостерігається за обставин суттєвого пригнічення, за рахунок статичних дефектів, когерентної складової розсіяного випромінювання. Завдяки цьому в умовах акустичного збудження товстий недосконалий кристал поводить себе як тонкий.

8. Вперше, в експериментах по вивченню амплітудних залежностей інтенсивності рефлекса в умовах РАР, дефектна структура реального кристала моделювалась за допомогою другого, незалежного джерела УЗК. При цьому спостерігались дифракційні

ефекти, у загальних рисах відомі з попередніх експериментів на кристалах з статичними полями деформацій.

9. Запропоновано метод визначення амплітуди ультразвукових коливань у кристалах з використанням двох джерел УЗК. Метод базується на аналізі профілів розподілу інтенсивності рефлексу по основі дельти Бормана в умовах РАР і має ряд переваг у порівнянні з відомими.

10. Запропоновано підхід до визначення інтегральних характеристик структурної досконалості слабопорушених бездислокаційних кристалів, що містять комбіновані (локалізовані і розподілені) деформації, який базується на порівнянні розрахованих для ідеального кристалу і виміряних за допомогою рентгеноакустичного резонансу екстинкційних довжин Λ . На прикладі кристалів, вирощених за методами Чохральського і БЗП, показано, що аналіз величин Λ і інтегральних відбиваючих здатностей кристалу для серії рефлексів, з залученням даних про рівень макродеформації, підвищує достовірність дифрактометричних даних.

11. Показано, що кристалам Si, вирощеним за методом Чохральського в магнітному полі (МЧ-Si) властивий високий рівень структурної однорідності, притаманний БЗП- матеріалу. При цьому рівень макродеформацій, обумовлений неоднорідним розподілом домішок, в МЧ-Si є вищим, ніж у кристалах, одержаних методом БЗП.

12. Кристали БЗП-Si, які зазнали трансмутаційного легування з наступним технологічним відпалом, характеризуються високим рівнем структурної однорідності і досить рівномірним розподілом питомого опору по об'єму матеріалу. Зразки ж МЧ-Si в результаті аналогічної обробки можуть в значній мірі втрачати вихідну однорідність. При цьому відбувається підвищення середнього рівня структурної недосконалості.

13. Виявлена кореляція рентгенодифракційних даних про характер зміни структурної однорідності кристалів МЧ-Si і БЗП-Si в процесі технологічної обробки з результатами вимірювання їх питомого опору. Спостережений факт неоднорідної перекомпенсації МЧ-Si пояснюється наявністю термодонорів і термоакцепторів кисневої природи, які утворились в процесі відпалу.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В ТАКИХ НАУКОВИХ ПРАЦЯХ

1. Khrupa V.I., Grigorev D.O., Nikolaev V.V., Datsenko L.I., Molodkin V.B. Influence of defects on the thickness dependence of integral reflectivity of dislocation-free silicon crystals // Phys. stat. sol. A.-1990.-V121, N1.-P.11-20.

2.Хрупа В.И., Даценко Л.И., Николаев В.В., Скороход М.Я., Григорьев Д.О. Влияние дефектов различной природы на отражательную способность слабопоглощающих кристаллов при варьировании порядка лауэ-дифракции//УФЖ-1989.-Т.34,№1- С.1732-1735.

3.Хрупа В.И., Григорьев Д.О., Даценко Л.И. Зависимость интегральной отражательной способности несовершенных кристаллов разных толщин от порядка динамической лауэ-дифракции//УФЖ.-1990.-Т.35,№9.-С.1393-1398.

4.Николаев В.В., Хрупа В.И., Скороход М.Я., Григорьев Д.О. Влияние поверхностных нарушений структуры на отражательную способность тонких кристаллов в случае лауэ-дифракции//Металлофизика.-1989.-Т.11,№2.-С.68-73.

5. Даценко Л.И., Скороход М.Я., Хрупа В.И., Григорьев Д.О. К вопросу увеличения в геометрии Лауэ отражающей способности толстого кристалла с нарушенной абразивной обработкой входной поверхностью//Поверхность. Физика. Химия. Механика.-1991.-в.5.-С.153-157.

6.Бабич В.М., Григорьев Д.О., Даценко Л.И., Хрупа В.И. Співставлення структурної однородності кремнію, одержаного методами Чохральського в магнітному полі та бестигельного зонного плавлення//УФЖ.-1993.-т.38,№9. -С.1398-1402.

7. Григорьев Д.О., Даценко Л.И., Мачулин В.Ф., Молодкин В.Б., Хрупа В.И. Влияние дефектов на отражающую способность акустически возбужденного кристалла //Металлофизика.-1993.-Т15, №1.-С.23-27.

8.Григорьев Д.О., Даценко Л.И., Мачулин В.Ф., Хрупа В.И. Влияние порядка лауэ-дифракции на зависимость отражающей способности реального кристалла от амплитуды ультразвуковых колебаний//УФЖ.-1993.-Т.38,№9.-С.1393-1398.

9.Григорьев Д.О., Даценко Л.И., Мачулин В.Ф., Хрупа В.И. Влияние дополнительных ультразвуковых деформаций на характер амплитудной зависимости отражающей способности акустически возбужденного кристалла в условиях рентгеноакустического резонанса //УФЖ.-1993.-Т.38,№11.-С.1709-1804.

10. Григорьев Д.О., Мачулин В.Ф., Хрупа В.И. Применение рентгеноакустического резонанса для изучения макродеформаций в реальных кристаллах//Заводская лаборатория.-1993.- Т.59,№4.-С.32-34.

11. Дзюблик А.Я., Григорьев Д.О., Даценко Л.И., Хрупа В.И. Особенности рентгеноакустического резонанса в поглощающем кристалле //Киев.-1993.-24 С. (Препр./АН Украины. Ин-т ядерных исслед.: КИЯИ-93-21

12. Даценко Л.И., Григорьев Д.О., Бригинец А.В., Мачулин В.Ф., Хрупа В.И. Определение доминирующего типа искажений структуры в реальных кристаллах методом рентгеноакустического резонанса. //Кристаллография.-1994.-Т39,№1.-С.73-78.

Подп. в печ. 11.04.94. Формат 60x84/16. Бум.офс.
Печ. офс. Усл. печ. л. 116. Усл.кр.-отт. 1,16.
Уч.-изд.л. 10. Тираж 100 экз. Заказ 306.

Институт проблем материаловедения
им. И.Н.Францевича АН УССР.
252680 Киев 680, ГСП, ул.Кржижановского,3.

Участок оперативной полиграфии
Института проблем материаловедения
им. И.Н.Францевича АН УССР.
252680 Киев 680, ГСП, ул.Кржижановского,3.

462724

AB 29.910
AB 29.910