

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ

На правах рукопису

ПРОКОПЕНКО ІГОР ВАСИЛЬОВИЧ

**ДЕФОРМАЦІЙНІ ПОЛЯ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ
МОНОКРИСТАЛАХ І ЕПІТАКСІЙНИХ СИСТЕМАХ ПРИ
ДИНАМІЧНОМУ РОЗСПОВАННІ РЕНТГЕНІВСЬКИХ ПРОМЕНІВ**

01.04.10 - фізика напівпровідників та діелектриків

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

КИЇВ - 1995 р.

321. 315. 59
537. 226

AB 33.07

Дисертацією є рукопис

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00761217 (0)

Робота виконана в Інституті фізики

Офіційні опоненти:

1. Член-кореспондент НАН України

доктор фіз.-мат наук, професор Молодкін Вадим Борисович

2. Доктор фіз.-мат. наук, професор Сальков Євген Андрійович

3. Доктор фіз.-мат. наук Григор'єв Олег Миколайович

Провідна організація: Інститут фізики НАН України.

Захист відбудеться " 27 " ЖОВТНЯ 1995 р. о. 14¹⁵ год.

на засіданні спеціалізованої Ради Д. 50.07.01. при Інституті фізики напівпровідників НАН України за адресою:

252028 Київ-28, проспект Науки, 45, конференц-зал Інституту фізики напівпровідників НАН України.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Інституту фізики напівпровідників НАН України.

Відгуки на автореферат у двох примірниках, завірених печаткою установи, просимо надсилати за адресою:

252028 Київ-28, проспект Науки, 45, Інститут фізики напівпровідників НАН України.

Автореферат розісланий " 25 " Вересня 1995 р.

Вчений секретар
спеціалізованої Ради

доктор фіз.-мат. наук

С.С. Іщенко

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертація присвячена експериментальному дослідженню закономірностей розсіювання рентгенівських променів і визначенню характеристик структурної досконалості в реальних напівпровідникових монокристалах і епітаксійних системах, які містять в собі розподілені (макро) і локалізовані (мікро) спотворення кристалічної ґратки, а також розробці на основі одержаних результатів нових методів структурної діагностики неоднорідних монокристалічних матеріалів і систем.

Актуальність теми. Розвиток сучасної твердотільної електроніки характеризується розширенням кола використовуваних напівпровідникових матеріалів, їх композицій, ускладненням технологічних процесів виготовлення приладових структур, зменшенням розмірів окремих елементів, підвищенням ступеня інтеграції схем. В цьому зв'язку значно підвищуються вимоги до структурної однорідності як вихідного підкладкового матеріалу, так і сформованих на його базі епітаксійних систем.

Вихідний неоднорідний розподіл дефектів різної природи (локалізованих спотворень структури) і далекодіючих деформаційних полів в монокристалах, процеси релаксації внутрішніх напруг в епітаксійних системах багато в чому визначають електрофізичні параметри, стійкість до зовнішніх впливів і надійність напівпровідникових приладів. Тому аналіз структурної досконалості напівпровідникових матеріалів і її взаємозв'язку з функціональними характеристиками приладів є самостійною науковою задачею, від розв'язку якої залежить подальший прогрес сучасної електроніки.

Одним з найбільш інформативних напрямків дослідження дефектів структури і деформаційного стану кристалічної ґратки є використання методів заснованих на розсіюванні рентгенівських променів. Розвиток уявлень про закономірності розсіювання рент-

генівських променів кристалічними середовищами і, особливо, розробка теорії динамічної дифракції рентгенівських променів в останній час дозволяють вирішити багато питань структурної діагностики реальних монокристалів і монокристалічних структур.

Разом з тим присутність в структурно-неоднорідних зразках одночасно локалізованих і розподілених полів деформацій робить задачу кількісної діагностики їх досконалості дуже складною, оскільки одночасний вплив на параметри розсіювання рентгенівських променів спотворень різної природи частіше всього є неадитивним, отже, і не може бути коректно розділений в одному експерименті. Саме тому аналіз особливостей розсіювання рентгенівських променів в реальних напівпровідникових матеріалах і системах потребує подальшого розвитку з виходом на кількісні оцінки структурних характеристик, що повинно забезпечити новий рівень сучасного матеріалознавства для електронної техніки.

Мета роботи. Дисертаційна робота виконана з метою вивчення закономірностей розсіювання рентгенівських променів і визначення параметрів структурної досконалості в напівпровідникових монокристалах і епітаксійних системах, які містять розподілені і локалізовані поля деформацій. При цьому в першу чергу в ній розглянуто можливості розділення внеску спотворень структурної досконалості різної природи на дифракційні параметри розсіювання рентгенівських променів і використання розроблених підходів для діагностики структурно неоднорідних зразків.

В процесі виконання роботи здійснено експериментальну перевірку узагальненої теорії динамічного розсіювання рентгенівських променів для випадку дифракції випромінювання в геометрії Брегга пружно вигнутим монокристалом. Це дозволило кількісно визначити вплив пружного вигибу монокристала на такі параметри дифракції рентгенівських променів, як величини інтегральної інтенсивності

дифракційного відбивання, напівширини кривої дифракційного відбивання в різних схемах дифракції і при різних розмірах джерела рентгенівських променів і запропонувати нові підходи до діагностики слабких пружних спотворень на поверхні монокристалів і монокристалічних систем.

У випадку спотворень структури в об'ємі напівпровідникового матеріалу і епітаксійних систем основною задачею роботи було розділення впливу на параметри розсіювання рентгенівських променів як розподілених, так і локалізованих деформаційних полів або можливість визначення відносного рівня пружних дисторсій кристалічної ґратки і густини дефектів по координаті на зразку.

Таке розділення здійснено на основі вимірів інтегральної відбивної здібності кристала при аномальному проходженні рентгенівських променів для $hk\bar{l}$ і $\bar{h}\bar{k}l$ лауе-відбиттів. Введення відношення інтегральних інтенсивностей для цих відбиттів, як дифракційної міри пружних дисторсій кристалічної ґратки, дозволило не тільки запропонувати модель розподілених внутрішніх макроскопічних деформаційних полів в кристалічній матриці, але і отримати кількісні оцінки рівня деформацій. Аналіз поведінки теоретичних і експериментальних залежностей величин інтегральних інтенсивностей дифракційних максимумів при аномальному проходженні рентгенівських променів у випадку деформацій атомних площин, проведений в роботі, дає можливість визначати локальну густину дефектів (дислокацій) по координаті на зразку (монокристалічній пластині) з величини напівсуми інтегральних інтенсивностей $hk\bar{l}$ і $\bar{h}\bar{k}l$ відбиттів, отримуючи найбільш адекватні значення інтегральних характеристик розсіювання рентгенівських променів.

Можливість одержання покоординатних значень величин, які визначають локалізовані і розподілені деформаційні поля в кристалічній матриці напівпровідникового матеріалу, була необхідна

також для аналізу структурних змін, що відбуваються при різних технологічних обробках матеріалу. В даному випадку в роботі планувалося дослідити структурні спотворення, які виникають при механічній обробці поверхні пластини, а також радіаційно-стимульовані процеси структурної перебудови при γ -опроміюванні підкладкового матеріалу.

Аналіз підкладкового монокристалічного матеріалу, а також деформаційних ефектів і ефектів структурної релаксації в епітаксійних і приладових структурах дозволив виявити вплив вихідного розподілу дефектів і структурних змін при радіаційних обробках приладових структур і приладів, сформованих на пластинах напівпровідників, на їх електрофізичні параметри, отримуючи відповідні кореляційні картограми цих параметрів.

Науковий напрямок, розвитку якого присвячена дисертація - закономірності розсіювання рентгенівських променів в реальних напівпровідникових матеріалах і епітаксійних системах, які містять розподілені і локалізовані спотворення кристалічної ґратки.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що в ній вперше:

а) експериментально підтвержені основні підсумки узагальненої теорії динамічного розсіювання рентгенівських променів в геометрії Брегга від пружно вигнутого монокристала, при цьому виявлені і теоретично обґрунтовані ефекти аномальної поведінки напівширини і інтенсивності в піку кривої дифракційного відбиття в різних схемах дифракції, що дозволяє аналізувати слабкі спотворення структури на поверхні монокристалів і епітаксійних систем.

б) проведений комплексний аналіз величин інтегральних інтенсивностей для hkl і $\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ відбиттів при Лауе-дифракції рентгенівських променів в структурно неоднорідних монокристалах, що дозволило дослідити закономірності розподілу дисторсій кристалічної ґратки, провести розділення локалізованих і розподілених де-

формаційних полів і визначити локальну густину дислокацій в межах моделі адитивного впливу деформацій різної природи на динамічне розсіювання рентгенівських променів;

в) введений новий дифракційний параметр W , рівний напівсумі інтегральних інтенсивностей hkl і $\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ відбиттів і відповідній йому інтегральні характеристики аномального проходження рентгенівських променів, що дозволило коректно визначати глибину порушеного механічною обробкою поверхневого шару напівпровідникових монокристалів з неоднорідним розподілом локалізованих та розподілених деформаційних полів;

г) визначений характер деформаційних ефектів і процесів структурної релаксації в епітаксійних структурах при варіації параметрів невідповідності кристалічних ґраток, коефіцієнтів теплового розширення і температурних меж переходу з пружного в пластичний стан в різних комбінаціях матеріалів півки і підкладки (системи Ge-Si, Si-Ge, Ge-GaAs, Al₃Ga_{1-x}As-GaAs);

д) визначені дозові границі процесів радіаційного відпалу і характер кореляції структурних і електрофізичних характеристик при радіаційно-стимульованій (опромінення γ -квантами) перебудові дефектів кристалічної ґратки в об'ємному напівпровідниковому матеріалі та епітаксійних приладових системах.

Наслідки роботи стимулювали розвиток теорії розсіювання рентгенівських променів, в даному випадку узагальненої теорії розсіювання рентгенівських променів пружно вигнутим кристалом в геометрії Брегга при визначенні меж використання тих чи інших наближень в залежності від реальних умов дифракції. Робота ініціювала постановку нових експериментів, особливо по вивченню радіаційно-стимульованих процесів структурної перебудови в монокристалах GaAs і епітаксійних системах на його основі.

Новизна прикладних результатів підтверджена авторськими

свідощтвами на винаходи і використанням їх в галузевих керівних документах МЕР СРСР.

Серед нових наукових результатів найбільш важливими є положення, які автор виносить на захист.

На захист виносяться такі положення:

1. Зростання інтегральної інтенсивності дифракційних максимумів відбивання рентгенівських променів пружно вигнутим кристалом в геометрії Брегга визначається тільки рівнем деформації кристала, практично не залежить від знака деформації при малих її значеннях і обмежується кінематичною межею при високих рівнях кривини кристала.

2. Аномальні ефекти поведінки напівширини і інтенсивності в піку кривої дифракційного відбивання в геометрії Брегга при слабких пружних вигинах поверхні монокристалів і епітаксійних систем визначаються знаком деформації і дисперсійними співвідношеннями в схемі дифракції. Це дозволяє ввести критерії вибору схеми дифракції при діагностиці слабких поверхневих спотворень для зразків різних кристалографічних орієнтацій.

3. В умовах сильного поглинання рентгенівських променів (ефект Бормана) в кристалах зі статистично неоднорідним розподілом густини дефектів (в присутності локалізованих і розподілених полів деформацій) можливе введення по координаті на зразку інтегральних характеристик аномального проходження рентгенівських променів при аналізі не тільки самих інтенсивностей hkl і $\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ відбиттів (фріделевських пар) але і для їх напівсуми, яка визначається тільки густиною дефектів (локалізованими полями деформацій) в межах моделі адитивного впливу деформацій різної природи на динамічне розсіювання рентгенівських променів.

4. Аналіз залежностей напівсуми інтегральних інтенсивностей фріделевських пар відбивання від товщини кристала в умовах силь-

ного поглинання рентгенівських променів дозволяє коректно визначити глибину порушених механічною обробкою поверхневих шарів монокристалів у випадку неоднорідного розподілу локалізованих і розподілених деформаційних полів.

5. Характер формування дефектної структури і деформаційні ефекти в епітаксійній системі Ge-Si визначаються механізмами крихкого руйнування і утворення систем мікротріщин (фрагментарної структури), в той час як зворотна система (Si-Ge) характеризується інтенсивним пластичним пливом в плівці і підкладці з утворенням в останній блочної дислокаційної структури. В проміжній же по розугодженості пружних і кристалографічних параметрів матеріалів плівки і підкладки епітаксійній системі Ge-GaAs релаксація внутрішніх напружень тільки частково реалізується за рахунок пластичної деформації, в результаті чого в плівці спостерігаються залишкові пружні напруження.

6. Радіаційно-стимульовані процеси релаксації внутрішніх напружень і структурного впорядкування в монокристалах GaAs і епітаксійних структурах на його основі визначаються, в залежності від дозових меж при опромінюванні γ -квантами, різними механізмами перебудови точкових дефектів - їх активним стоком на дислокації та об'ємні макронеоднорідності монокристала і їх гетеруванням на міжфазні межі в епітаксійних структурах.

Практична цінність та впровадження результатів роботи полягають в тому, що шляхом експериментальних досліджень і теоретичного аналізу особливостей розсіювання рентгенівських променів в напівпровідникових монокристалах і епітаксійних структурах, які містять у собі локалізовані і розподілені деформаційні поля:

а) встановлені нові закономірності динамічного розсіювання рентгенівських променів в кристалічних структурах зі складним розподілом деформаційних полів;

б) розроблені методи побудови картограм пружних дисторсій атомних площин і густини дефектів (дислокацій) в структурно неоднорідних монокристалах з використанням нових дифракційних параметрів розсіювання рентгенівських променів - відношення і напівсуми інтенсивностей hk_l і $\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ лауе-відбиттів;

в) визначений характер деформаційних ефектів і запропоновані моделі деформацій кристалічної ґратки в монокристалах і епітаксійних системах;

г) розроблені методи контролю глибини порушених механічною обробкою поверхневих шарів в структурно неоднорідних напівпровідникових монокристалах;

д) запропоновані нові експериментальні схеми рентгенівської структурної діагностики реальних напівпровідникових монокристалів і епітаксійних систем;

е) визначені дозові межі процесів радіаційного відпалу (ефекта малих доз) і початку деградаційних процесів при опроміненні γ -квантами різних епітаксійних приладових систем на основі GaAs.

Розроблені в дисертації експериментальні методи і одержані результати мають значну практичну цінність, що підтверджується використанням їх для діагностики в технологічних процесах виробництва приладів мікроелектроніки.

Методики контролю структурної досконалості неоднорідних напівпровідникових монокристалів і систем використовуються в умовах виробництва АТ "Сатурн" (м.Київ), ввійшли в галузеві керівні документи МЕР СРСР. Одержані в дисертаційній роботі результати використані при виконанні робіт, що проводяться по замовленню підприємств електронної промисловості України.

Достовірність і обґрунтованість одержаних в дисертації результатів забезпечується комплексним характером досліджень, підтвердженням кількісних і якісних результатів незалежними експе-

риментальними методами.

Методологія дисертаційної роботи засновується на експериментальному застосуванні в першу чергу:

а) вимірів параметрів кривих дифракційного відбивання: інтегральної інтенсивності, напівширини, інтенсивності в максимумі кривих у випадку дифракції рентгенівських променів в геометрії Бреґга і Лауе;

б) рентгенотопографічних зйомок зразків по схемах Бормана, Ланга і Берга-Баррета з використанням як симетричних, так і асиметричних відбивань;

в) рентгенотопографічні зйомки з використанням синхротронного випромінювання в комбінованій схемі Бреґг-Лауе дифракції.

Крім того, в роботі проведені дослідження з використанням повного навколишнього відбивання рентгенівських променів, причому була запропонована нова схема реалізації повного зовнішнього відбивання, яка підвищує роздільну здатність методу.

В роботі проводились виміри електрофізичних параметрів бар'єрних структур при аналізі вольтамперних характеристик і порівняння картограм цих параметрів по великим масивам сформованих на підкладковому матеріалі напівпровідникових приладів і приладових систем з відповідними картограмами розподілу локалізованих і розподілених спотворень кристалічної структури.

Як допоміжні використовувались металографічні методи - вибіркоче хімічне травлення поверхні зразків і епітаксійних систем.

Об'єктами досліджень в роботі були монокристалічні пластини напівпровідників Si, Ge, GaAs, епітаксійні системи і приладові структури на їх основі. Зразки були одержані в різних технологічних умовах вирощування і характеризувалися неоднорідним розподілом спотворень кристалічної ґратки в об'ємі і на поверхні.

Апробація роботи. Матеріали дисертаційної роботи були по-

відомлені і обговорювались на таких конференціях:

Всесоюзная конференция по физике и технологии тонких пленок (Ивано-Франковск, 1984 г.); VII Всесоюзный симпозиум "Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы" (Львов, 1986 г.); Совецание по Всесоюзной межвузовской комплексной программе "Рентген" (Ереван, Черновцы, 1987, 1989 г. г.); IV Республиканская научно-техническая конференция "Физические методы диагностирования" (Чернигов, 1989; Всесоюзной конференции "Физические основы твердотельной электроники" (Ленинград, 1990 г.); Всесоюзная конференция "Актуальные проблемы технологии композиционных материалов" (Ялта, 1990 г.); II Международный симпозиум по синхротронному излучению SI-90 (Москва, 1990 г.); II Конференция по динамическому рассеянию рентгеновских лучей в кристаллах (Кацивели, 1990 г.); Всесоюзный научный семинар "Многослойные структуры узкозонных полупроводников" (Нукус, 1990 г.); Всесоюзный семинар "Нелинейные высокочастотные явления в полупроводниках и полупроводниковых структурах и проблемы их применения в электронике СВЧ" (Навои, 1991 г.); Международная научно-техническая конференция "Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов", (Н. Новгород, 1992 г.); International conference on microelectronics and computer science (Kishinev, Moldova, 1992); International workshop "Characterization of semiconductor substrates and structures" (CSF) Smolenice, 1992); International Annual Semiconductor Conference, (Sinaia, Romania, 1993); IV Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок (Івано-Франківськ, 1993 р.); Межрегиональная научно-техническая конференция "Комплексное математическое и физическое моделирование, обеспечение надежности электронных приборов и аппаратуры" (Бердянск, 1994 г.); Ukraine-USA - summer school on chemistry and physics of surfaces (Kiev, 1994); 9th

International Meeting on Radiation Processing (Turkey, Ankara, 1994), I Международная конференция "Новые материалы и приборы" (Ташкент, 1994), 5 th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology (ISRAMT'95, Kiev, Ukraine, 1995), Frontiers in Nanoscale science of micron/submicron devices (Kiev, Ukraine, 1995), SPIE's International Symposium on Optical science Engineering and Instrumentation (USA, San-Diego, 1995), а також доповідалися на Лашкарьовських читаннях (ІФН НАН України) в 1986, 1991 роках.

Публікації. По матеріалам дисертаційної роботи опубліковано 35 друкованих робіт, включаючи монографію, три огляди, п'ять авторських свідочств на винаходи.

Особистий внесок автора дисертації.

З експериментальних результатів, опублікованих в друкованих виданнях в співавторстві, автору дисертації належать ті, які приведені в дисертаційній роботі за виключенням окремих, відмічених у тексті. Автором самостійно запропонований і апробований метод розділення внеску локалізованих і розподілених деформаційних полів в інтенсивність розсіювання рентгенівських променів в структурно неоднорідних монокристалах, заснований на моделі адитивного впливу деформацій різної природи на аномальне проходження рентгенівських променів. Автором самостійно вирішена задача визначення глибини порушеного абразивною обробкою поверхневого шару в неоднорідних монокристалах.

Автору також належать всі методичні рішення експериментів, викладених в дисертації.

В друкованих роботах, які увійшли в список друкованих і написаних в співавторстві, автор дисертації приймав рівну з співробітниками участь в постановці задачі, інтерпретації результатів, формуванні висновків та узагальнень на їх основі.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається з вступу,

п'яти глав (кожна із яких містить вступ і закінчення), закінчення і переліку основних результатів. Загальний обсяг дисертації складає 257 машинописних сторінок, включаючи 147 сторінок основного тексту, 10 малюнків, 10 таблиць, список цитованої літератури з 213 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині дається загальна характеристика роботи: розглядається актуальність вибраного напрямку досліджень, формулюються мета і задачі роботи, наукова новизна і практична цінність результатів, приведені основні положення що захищаються, а також короткий зміст роботи.

В першій главі викладені експериментальні результати і проведений теоретичний аналіз впливу пружної розподіленої деформації кристалів на параметри динамічного розсіювання рентгенівських променів у випадку геометрії Брегга.

Експериментально досліджені залежності параметрів кривої дифракційного відбиття - інтегрального коефіцієнта відбиття R'_B , напівширини ω і інтенсивності в піку кривої I_B від параметра градієнта деформації B (або радіуса кривини R) бездислокаційних кристалів Si . Показано, що теоретичні та експериментальні залежності $R'_B(B)$ добре узгоджуються, причому вперше експериментально підтверджений один з основних висновків узагальненої теорії розсіювання рентгенівських променів вигнутим кристалом про обмеження зростання інтегрального коефіцієнта відбивання кінематичною межею розсіювання.

Проведений аналіз можливого впливу анізотропії пружних властивостей кристала Si на параметри динамічного розсіювання рентгенівських променів і показано, що врахування анізотропії якісно не змінює теоретичні залежності $R'_B(B)$, а експериментальні дані підтверджують коректність застосування в теоретичних розра-

хунках ізотропного наближення.

Виявлена аномальна поведінка залежностей $\omega(R)$ і $I_0(R)$ для дисперсійних відбиттів при малих деформаціях ($|R|^{-1} \leq 0,5 \text{ м}^{-1}$) - зменшення величини ω і зростання I_0 порівняно з вихідним станом кристала (при відсутності деформації), що, як показує теоретичний аналіз, визначається дисперсійними співвідношеннями в схемі дифракції і спектральними характеристиками джерела рентгенівського випромінювання.

В області великих деформацій ($|R|^{-1} \geq 0,5 \text{ м}^{-1}$) для дисперсійних відбиттів і у всьому інтервалі деформацій для бездисперсійних відбиттів спостерігається лінійна залежність $\omega(R)$, яка визначається розмірами джерела рентгенівського випромінювання в площині дифракції, що дозволяє використати вигнутий кристал як аналізатор відбиття або циліндричну лінзу з заданим коефіцієнтом збільшення. Пікова ж інтенсивність в цих випадках є монотонною спадаючою функцією деформації.

Оскільки в областях малих деформацій залежність $R_1^2(B)$ практично симетрична відносно знака деформації, аномальна поведінка напівширини і інтенсивності в піку кривої дифракційного відбиття дозволяє розв'язати зворотню задачу - визначення знаку і величини пружної деформації кристала у випадку дифракції рентгенівських променів в геометрії Брегга при діагностиці слабких спотворень структури на поверхні монокристалів і епітаксійних структур.

У другій главі аналізується розподілення залишкових пружних дисторсій кристалічної ґратки і густини дислокацій в структурно неоднорідних монокристалах у випадку лауе-дифракції рентгенівських променів.

Досліджений розподіл залишкових пружних дисторсій атомних площин в кристалах Si і GaAs, які мають різний характер розподілу і різний рівень густини дислокацій і дислокаційних ан-

самблів, сформованих у процесі вирощування. Показано, що якщо в кристалах Si розподіл пружних дисторсій визначається симетрією макророзподілу густини дислокацій, то для GaAs він швидше пов'язаний з комірковим характером мікророзподілу дислокацій.

В рамках моделі адитивного впливу деформацій різної природи запропоновано ввести у випадку аномального проходження рентгенівських променів новий дифракційний параметр W , рівний напівсумі інтегральних інтенсивностей hkl і $\bar{h}\bar{k}\bar{l}$ відбиттів. Це дозволило провести розділення вкладу розподілених пружних і локалізованих спотворень ґратки в структурно неоднорідних монокристалах на параметри динамічного розсіювання рентгенівських променів. Показано, що величина $\ln W$ найбільш адекватно визначає локальну густину дислокацій в досліджуваних кристалах Si і GaAs.

Проведено дослідження пружних спотворень кристалічної ґратки в бездислокаційних монокристалах Ge, легованих As, які містять так звані "каналні" неоднорідності розподілу легуючих атомів. Запропонована модель деформацій і одержаний розподіл абсолютних величин деформацій кристалічної ґратки на межах "каналної" неоднорідності. Досліджена поведінка інтегральних характеристик аномального проходження рентгенівських променів в Ge в залежності від рівня пружної деформації кристалічної матриці.

При аналізі залежностей розподілу $\ln W$ по координаті від товщини кристала GaAs визначені величини ефективних інтегральних характеристик μ_1^* і γ_1^* , які залежать тільки від густини дислокацій N_d в точці вимірювання. Показано, що залежність $\mu_1^*(N_d)$ є лінійною функцією. При густинах $N_d \geq 8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ виявлений перехід у динамічний канал дифузійного розсіювання рентгенівських променів, причому дифузійна компонента $\mu_{\text{д}}^*$ також лінійно залежить від густини дислокацій.

Аналіз результатів свідчить про те, що в структурно неоднорід-

них монокристалах можливе ефективне розділення внесків розподілених пружних дисторсій кристалічної ґратки і густини локалізованих структурних дефектів при вимірюванні інтенсивностей I_{kl} і I_{kl} - лауе-відбиттів рентгенівських променів по координаті зразку.

В третій главі обговорені особливості структурних спотворень, які виникають при механічній обробці поверхневих шарів напівпровідникових монокристалів.

Розглянуті питання, пов'язані з впливом пружної деформації кристалічної матриці при наявності порушеного механічною обробкою (шліфовка на вільному абразиві) поверхневого шару на інтенсивність розсіювання рентгенівських променів при лауе-дифракції в бездислокаційних кристалах Si. Показано, що вигин, який виникає в зразках у випадку односторонньої шліфовки, призводить до суттєвого перерозподілу дифрагованого випромінювання у всьому спектрі довжин хвиль при асиметричній дифракції в однокристалічному випадку. Таким чином, визначення глибини порушеного шару за рахунок різниці в механізмах поглинання в неспотвореній матриці і в шліфованому шарі можливе при некомпенсованому вигині зразка тільки у випадку симетричної дифракції. Експериментально доведена коректність застосування формули Стоуні для визначення величини ефективних напружень в шліфованому шарі.

В структурно неоднорідних зразках GaAs, в яких, крім варіації густини дефектів (дислокацій), є далекодючі поля пружної деформації, пов'язані з градієнтами концентрації дефектів, контроль глибини порушеного шару, по-перше, вимагає точної фіксації точок вимірювання, по-друге, необхідне розділення внесків локалізованих і розподілених спотворень структури. З цією метою запропоновано використати як основну вимірну величину параметр W при дифракції рентгенівських променів, яка визначається тільки локалізованою густиною дефектів. Вимірювання, проведені по координаті на

ЛІБ ім. В. Стефаника
вул. С. П. Корняків
Київ

пластинах GaAs з різною густиною дислокацій, як при двосторонній, так і при односторонній шліфовці, показали, що застосування параметра W дозволяє коректно визначати глибину порушеного шару незалежно від наявності або відсутності пружних дисторсій атомних площин в точках вимірювання. Дані вимірів дають можливість вважати, що помітний вплив дифузійного розсіювання в порушеному шарі на інтенсивність дифрагovanого випромінювання (тобто аномальне проходження дифузійної компоненти) відсутній.

В четвертій главі наведені результати досліджень особливостей розподілених і локалізованих спотворень структури в епітаксійних напівпровідникових структурах і приладових системах.

Розглянуті особливості релаксації механічних напружень, що виникають у процесі епітаксійного росту в гетероепітаксійних системах Ge-Si, Si-Ge і Ge-GaAs, які характеризуються різним ступенем розузгодженості механічних і термічних властивостей півки і підкладки.

Методами рентгенівської топографії показано, що для системи Ge-Si характерним є утворення так званої фрагментарної структури - системи мікротріщин, які поширюються шляхом крихкого руйнування вздовж певних кристалографічних напрямків півки в підкладку. Визначено, що мікротріщини незалежно від кристалографії підкладки поширюються нормально до поверхні гетеросистеми. Запропонована модель деформаційних полів поблизу межі фрагментів (мікротріщин).

В системі Si-Ge в процесі епітаксійного росту виникає інтенсивний пластичний плин з утворенням тримірної сітки дислокацій, які формують блочну структуру підкладки. Якщо в системі Ge-Si напружений стан системи знімається після видалення півки, то деформація в системі Si-Ge має повністю пластичний характер.

На відміну від різко контрастуючих по своїм залишковим де-

формаційним ефектам систем Ge-Si і Si-Ge, система Ge-GaAs визначається частковою релаксацією пружних напружень шляхом пластичної деформації. Залишкові пружні напруження, приводять до зміни кривини системи при видаленні півки.

В главі проаналізовані деформаційні ефекти в епітаксійній системі GaAlAs-GaAs з субмікронними півками, яка є основою для формування НЕМТ-транзисторів. Для дослідження меж епітаксійних шарів в системі запропонована нова схема одержання кривих повного зовнішнього відбивання з підвищеною роздільною здатністю за рахунок використання трикристальної схеми. Характер деформаційних ефектів, які спостерігалися рентгенодифракційними методами в приповерхневому шарі підкладок у зразках системи, повністю корелював зі структурною досконалістю меж епітаксійних шарів, які визначаються по кривих повного зовнішнього відбивання.

Таким чином, комплекс рентгенодіагностичних методів дозволив визначити характер деформаційних ефектів в епітаксійних системах з різною розмірністю епітаксійних шарів і характером сформованих спотворень структури.

У п'ятій главі розглянуті радіаційно-стимульовані ефекти структурної перебудови в монокристалах GaAs і епітаксійних прикладових структурах на його основі.

Досліджувались процеси, які чиняться при опроміненні γ -квантами (^{60}Co) у пластинах GaAs з різним рівнем густини дислокацій і неоднорідності їх розподілу. Показано, що в межах доз опромінення $10^4\text{P} - 10^9\text{P}$ в об'ємі матеріалу відбувається значний перерозподіл точкових дефектів, який визначається локальною густиною дислокацій і призводить до зміни розподілу пружних дисторсій в кристалах в порівнянні з вихідним станом.

При опроміненні n-p⁺ епітаксійних систем на основі GaAs основним процесом є стікання точкових дефектів в область межі n-

n^+ з одночасною їх коагуляцією. Характер дозових меж процесів структурної перебудови повністю корелював зі змінами параметрів діодів Шоттки, сформованих на цих епітаксійних системах - від покращання параметрів при дозових навантаженнях до 10^5 Р (ефект малих доз) до початку деградаційних процесів на рівні доз 10^7 Р.

Вивчені процеси радіаційно-стимульованої релаксації пружних напружень в системах GaAs-Mo і GaAs-W. Виявлено, що під дією опромінення в зразках GaAs-Mo виникають складні структурні зміни, які не знімають повністю пружних напружень в системі. В зразках GaAs-W радіаційний вплив приводить до повної релаксації пружних напружень незалежно від режиму попередніх термообробок.

З допомогою картографування структурних і електрофізичних параметрів пластин GaAs і сформованих на них дискретних діодів Шоттки проведені дослідження впливу планарної неоднорідності вихідного підкладкового матеріалу на радіаційну стійкість бар'єрних структур. Як підкладковий матеріал були вибрані стандартні пластини АГЧП-7 з густиною дислокацій від $N_d \approx 10^4$ см⁻² до $N_d \approx 10^5$ см⁻² і експериментальний напівізолюючий GaAs з $N_d \leq 5 \cdot 10^3$ см⁻² і з однорідним розподілом густини дислокацій по пластині. Показано, що в вихідному стані спостерігається повна кореляція в розподілах структурних і електрофізичних параметрів. При γ -опроміненні рівень дозових меж радіаційного відпаду і початку деградаційних процесів суттєво залежить від густини дислокацій в підкладковому матеріалі і у випадку неоднорідного розподілу дислокацій (в пластинках АГЧП-7) визначається планарною картиною цього розподілу.

Комплекс проведених досліджень показав перспективність розроблених методів структурної діагностики, які включають можливість картографування розподілу пружних дисторсій кристалічної ґратки і локальної густини дислокацій, що дозволяє одержати коре-

ляційні дані по структурним і електрофізичним параметрам.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ

1. Експериментально кількісно підтверджені основні результати узагальненої теорії розсіювання рентгенівських променів вигнутим кристалом в геометрії Бреґга і показано, що відповідність теорії і експерименту спостерігається у випадку ізотропної моделі пружних властивостей кристалів Si, а при високих рівнях деформації інтегральна інтенсивність рентгенівських променів виходить на кінематичну межу.

2. Виявлена аномальна поведінка таких параметрів кривої дифракційного відбивання пружно вигнутих кристалів у випадку геометрії Бреґга, як інтенсивність в піку і напівширина кривої дифракційного відбивання при малих рівнях деформації, які визначаються дисперсійними співвідношеннями в схемі дифракції, що дозволяє виявляти слабкі локальні деформації на монокристалічних поверхнях.

3. Напівширина кривої дифракційного відбиття пружно вигнутого кристалу в геометрії Бреґга, починаючи з певного рівня деформацій, має лінійну залежність від кривини кристалу, параметри якої визначаються розмірами джерела випромінювання рентгенівських променів в площині дифракції (або відбитого від досліджуваного кристалу пучка рентгенівських променів), що дозволяє використовувати вигнутий кристал як збільшуючу циліндричну лінзу.

4. Аналіз фріделевських пар відбивання у випадку аномального проходження рентгенівських променів дозволив дослідити розподіл пружних дисторсій в напівпровідникових монокристалах з різним характером сформованої в процесі росту зливків дефектної структури. Показано, що в кристалах Si і Ge розподіл пружних дисторсій визначається симетрією макророзподілу дефектів (або леґуючої домішки), тоді як в кристалі GaAs пружні дисторсії

розподілені по площині пластини нерегулярно, що пов'язано з мікроструктурою дислокаційних ансамблів в GaAs (наявністю коміркової дислокаційної структури).

5. Введення в межах моделі адитивного впливу деформацій різної природи на аномальне проходження рентгенівських променів напівсуми інтегральних інтенсивностей Фріделевських пар відбивання рентгенівських променів (параметра W) дозволяє провести розділення вкладу локалізованих і розподілення деформаційних полів в структурно-неоднорідних монокристалах. Показано, що величина логарифма напівсуми інтенсивностей найбільш адекватно відповідає локалізованій густині дефектів (дислокацій).

6. Показано, що для напівсуми інтегральних інтенсивностей Фріделевських пар відбивання рентгенівських променів (параметра W) в структурно-неоднорідних монокристалах можливе введення інтегральних характеристик μ_1^* і y_1^* по координаті на зразку, при цьому одержана лінійна μ_1^* залежність від густини дислокацій для монокристалів GaAs, а при густині дислокацій $N_d \geq 8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ спостерігається входження в динамічний канал дифузійного розсіювання рентгенівських променів, причому дифузійна компонента μ_d^* також лінійно залежить від густини дислокацій.

7. В структурно-неоднорідних монокристалах глибина порушених механічною обробкою поверхневих шарів може бути адекватно визначена тільки при аналізі інтегральних інтенсивностей Фріделевських пар - при рівності параметра Y одиниці по фотоелектричному поглинанню в порушеному шарі однієї із інтенсивностей пари або по змінюванню величини напівсуми інтенсивностей (параметру W) при відхиленні параметра Y від одиниці.

8. Дослідження залишкових деформаційних ефектів і релаксаційних процесів в епітаксійних системах Ge-Si, Si-Ge і Ge-GaAs показали, що кожній системі властиві свої особливості дефектної

структури, які визначаються температурними межами пружних і пластичних властивостей матеріалів півки і підкладки. Якщо система Ge-Si в основному деформується пружно з виникненням в ній фрагментарної структури, а в системі Si-Ge розвиваються інтенсивні процеси пластичного ковзання з утворенням блочної структури, то система Ge-GaAs характеризується наявністю в ній як залишкових пружних напружень, так і пластичної деформації.

9. При дослідженні епітаксійних систем $Ga_2Al_{1-x}As$ -GaAs з субмікронними півками комплексом методів асиметричної рентгенівської топографії і повного зовнішнього відбивання рентгенівських променів показано, що характер деформаційних ефектів в системі і досконалість меж епітаксійних шарів визначаються як технологічними умовами епітаксійного нарощування, так і структурною однорідністю підкладкового матеріалу. Запропонована нова схема реалізації повного зовнішнього відбивання рентгенівських променів, яка підвищує роздільну здатність метода при спостереженні інтерференційних ефектів на схилі кривої повного зовнішнього відбивання.

10. Показано, що радіаційно-стимульовані процеси релаксації внутрішніх напружень і структурного впорядкування в монокристалах GaAs і епітаксійних структурах на його основі визначаються різними механізмами перебудови точкових дефектів - їх активним стоком на дислокації і об'ємні макронеоднорідності монокристалу і їх гетеруванням на міжфазних межах і утворенням кластерів у епітаксійних структурах.

11. Особливості розподілу структурних дефектів по площі монокристалічних пластин GaAs повністю корелюють з електрофізичними параметрами приладів (польові транзистори Шоттки), сформованих на них, при цьому в процесі радіаційних обробок цих приладів виявляється взаємозв'язок їх надійнісних властивостей і до-

зових меж ефекту малих доз і початку деградаційних процесів від густини дефектів (дислокацій) в підкладковому матеріалі.

Основний зміст дисертації опубліковано в роботах:

1. Структурная релаксация в полупроводниковых кристаллах и приборных структурах (Монография) / Е.Ф.Венгер, М.Грендел, В.Данишка, Р.В.Конакова, И.В.Прокопенко, Ю.А.Тхорик, Л.С. Хазан. Киев: Феникс, 1994.- 244 с.
2. Взаимодействие арсенида галлия с ионизирующим излучением и проблемы радиационной стойкости арсенидгаллиевых приборов (Обзор) / А.В.Бобыль, Р.В.Конакова, В.К.Кононов, В.Г.Малинин, М.М.Малышев, И.В.Прокопенко, М.И.Слущкий, Ю.А.Тхорик // Электронная техника. Сер. Управление качеством.-1992.- вып.4-5.- С. 31-39.
3. Оптические и рентгенодифракционные методы контроля параметров полупроводниковых структур GaAs. (Обзор) / С.А.Васильковский, А.М.Евстигнеев, К.А.Исмаилов, Р.В.Конакова, И.Ю.Ильин, И.В.Прокопенко, Ю.А.Тхорик // Часть 1.- Узб.физ.журн.- 1995. - №1.- С.12-42.
4. Оптические и рентгенодифракционные методы контроля параметров полупроводниковых структур (Обзор) / С.А.Васильковский, А.М.Евстигнеев, К.А.Исмаилов, Р.В.Конакова, И.Ю.Ильин, И.В.Прокопенко, Ю.А.Тхорик // Часть 2.- Узб.физ.журн.-1995.- №4.- С.20-45.
5. Mechanical stresses in the heterosystem germanium-gallium arsenide / L.I. Datsenko, A.P. Klimenko, L.A.Matveeva, I.V.Prokopenko, Yu.A.Tkhorik // Thin Solid Films.- 1976.- 33, N 3.- P. 275-280.
6. Гуреев А.Н., Прокопенко И.В. Определение глубины нарушенных механической обработкой поверхностных слоев в структурно неоднородных кристаллах. // Заводская лаборатория - 1979.- 45.- С. 536-538.

7. Прокопенко И.В., Даденко Л.И. Рассеяние рентгеновских лучей монокристаллами кремния с механически поврежденным поверхностным слоем // Укр. физ. журн.- 1982.- 27, N 1.- С. 50-54.
8. Особенности лауэ-дифракции рентгеновских лучей в кристаллах с нарушенной абразивной обработкой поверхностью/ Л.И. Даденко, Е.Н. Кисловский, Т.Г.Крыштаб, И.В.Прокопенко // Поверхность. Физика, химия, механика.- 1985.- N 8.- С. 69-73
9. Влияние дефектов, возникающих при абразивной обработке поверхности на рассеяние рентгеновских лучей тонкими кристаллами в случае лауэ-дифракции / И.В. Когут, В.И. Хрупа, Л.И.Даденко, И. В. Прокопенко // Металлофизика. - 1985.- 7, N1.- С. 81-84.
10. Экспериментальное и теоретическое исследование брэгговского отражения рентгеновских лучей от упругоизогнутого кристалла кремния / К.Т.Габризян, Е.Н.Кисловский, И.В.Прокопенко, Ф.Н.Чуховский // ФТТ.-1986.- 28.-в. 10.- С. 3215-3222.
11. Experimental and theoretical study of elastic bending effect on (111) Bragg diffraction in silicon crystals/ F.N.Chukhovskii, K.T.Gabrielyan, E. N. Kislovskii, I. V. Prokopenko // Phys. Stat. Sol. (a).- 1987.- 103.- P. 381-387.
12. Прокопенко И. В., Осадчая Н. В. Экспресс-метод контроля совершенства пластин // Электронная техника, сер. 8.- 1989.- вып.1(304).- С. 21-22.
13. Межфазные взаимодействия на границе контакта, подвергнутого электрорадиационным воздействиям / Р.В.Конакова, В.В.Миленин, А.А.Наумовец, Б.А.Нестеренко, И.В.Прокопенко, Ю.А.Тхорик // Электронная техника, сер. 8.- 1989.- вып. 1(304).-С. 65-67.
14. Формирование изображения источника при брэгговской дифракции рентгеновских лучей изогнутым кристаллом/ К.Т.Габризян, Е.Н.Кисловский, Ю.М. Литвинов, И.В. Прокопенко,

Ф.Н.Чуховский// Металлофизика.- 1991.- 13, N 4.- С. 3-11.

15. Электрорадиационные изменения в барьерных структурах платина-арсенид галлия / С. А. Груша, Р. В. Конакова, В. В. Миленин, И. В. Прокопенко, Ю.А. Тхорик // Электрон. техн., сер. 2.- 1990.- вып. 5 (108).- С. 1-6.
16. Радиационные эффекты в эпитаксиальных p-n⁺ структурах GaAs и диодах Шоттки на их основе / К.А. Исмаилов, Р. В. Конакова, И.В.Прокопенко, Н.В. Осадчая // Доклады АН Республики Узбекистан.- 1992;-N 8, 9.- С. 42-44.
17. Исмаилов К.А., Осадчая Н.В., Прокопенко И.В. Особенности микроструктуры эпитаксиальных слоев арсенида галлия, облученных гамма-квантами ⁶⁰Co // Узб. физ. журн. 1993;-N 3.- С. 77-79.
18. Прокопенко И.В., Исмаилов К.А., Сейтмуратов М.Е. Рентгеновская структурная диагностика полупроводниковых субмикронных эпитаксиальных систем на основе GaAs// Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.- 1994.- вып.27.- С. 64-68.
19. Термостабильность контактов W-GaAs, Mo-GaAs/ Р.В.Конакова, Й.Лидди, В.В. Миленин, И.В.Прокопенко, Ю.А.Тхорик // Физика и химия обработки поверхности.- 1994.- вып.1.- С. 104-107.
20. Изучение особенностей межфазных взаимодействий на границе раздела TiN - GaAs, подвергнутой γ -облучению / И. Готовы, К.А. Исмаилов, Р.В. Конакова, В.В. Миленин, И.В. Прокопенко, Ю.А.Тхорик // Физика и химия обработки материалов.- 1994.- вып. 2.- С. 19-23.
21. Влияние структурной неоднородности подложечного арсенида галлия на радиационную стойкость барьеров Шоттки /К.А.Исмаилов, И.Ю. Ильин, Р.В. Конакова, В.В. Миленин, В.Г.Малинин, И.В.Прокопенко, В.В.Статов, Ю.А.Тхорик// Петербургский журн. электроники (Приложение 2. "Радиационно-надежные характеристики изделий электронной техники в

- экстремальных условиях эксплуатации") - 1994. - С. 80-86.
22. Влияние радиационностимулированных структурных изменений на электрофизические характеристики диодов Шоттки на основе арсенида галлия /И.В.Прокопенко, Р.В.Конакова, К.А.Исмаилов, Н.В.Осадчая// Физика и химия обработки поверхности.- 1994.- вып. 4.- С. 12-16.
23. Влияние γ -радиации на явление переноса в НЕМТ - структурах AlGaAs/GaAs / А. В. Бобыль, К. А. Исмаилов, Р. В. Конакова, В.В. Миленин, И.В. Прокопенко, Ю.А. Тхорик // Петербургский журнал электроники. (Приложение N 4).- 1994.- С. 111-118.
24. Изучение особенностей микроструктуры и электрофизических свойств контактов TiN/GaAs, подвергнутых γ -облучению/ И.Готовы, К.А.Исмаилов, Р.В. Конакова, В.В. Миленин, И.В.Прокопенко, Ю.А.Тхорик// Поверхность. Физика, химия, механика.- 1994.-N 8/9.- С.74-80.
25. А.С. N 1255906 СССР. Способ контроля структурного совершенства монокристаллов/ Л.И.Даценко, А.Н.Гуреев, И.В.Прокопенко, В.И.Хрупа.-8.05.1986.
26. А.С. N 148435 СССР. Способ контроля характеристик источника рентгеновского излучения/К.Т.Габриелян,Е.Н.Чуховский, Е.Н.Кисловский, Л.И.Даценко, И.В. Прокопенко, В.И. Хрупа. - 8.02.1989.
27. А.С. N 1481445 СССР, Способ определения толщины нарушенного слоя в монокристаллах / Л.И. Даценко, Е.Н. Кисловский, И.В.Прокопенко, В.И.Хрупа. -8.04.1990.
28. А.С. N 1739750 СССР. Способ контроля структурного совершенства полупроводниковых монокристаллов / И.В.Прокопенко, Л.И. Даценко, Р.В. Конакова, Н.В. Осадчая, Ю.Е. Сухина. - 18.07.1990.
29. Полож. решение по изобретению N 4899125. Способ контроля толщины поверхностного нарушенного слоя в монокристаллах /

И.В. Прокопенко, Н.В. Осадчая, Ю.Е.Сухина, М.Е.Сейтмуратов, Г.Д.Мельников. - 03.01.1991.

30. Исследование структурного совершенства полупроводниковых кристаллов и гетероструктур / Л.И.Даценко, Д.Л.Егикян, И.П.Карабеков, Р.А.Микаэлян, И.В.Прокопенко // Научное сообщение ЕФИ-206(52).-1976.-С.12.
31. Даценко Л.И., Прокопенко И.В., Скороход М.Я. Исследование деформаций решетки на границах канальных неоднородностей кристаллов с помощью рассеяния рентгеновских лучей// Материалы Всесоюзного межвузовского совещания по многоволновому рассеянию рентгеновских лучей.- Ереван, 1978.- С. 143-147.
32. Прокопенко И. В., Осадчая Н. В. Анализ остаточных упругих напряжений и распределения плотности дислокаций в структурно-неоднородных монокристаллах//В кн.: Труды II конференции по динамическому рассеянию рентгеновских лучей в кристаллах с динамическими и статическими искажениями.- Киев: ИМФ АН Украины.- 1991.- С. 104-109.
33. Prokopenko I. V. Analysis of the residual elastic lattice distortion and distribution of dislocation density in structural inhomogeneous GaAs crystals //In: Proceedings of the International Conference on Microelectronics and Computer Science.- Kishinev: Moldova, 1992.- 1.- P. 41-44.
34. Prokopenko I.V. The radiation stimulated processes in GaAs MESFET and planar structural homogeneity of substrate material// In: Proceedings of the 16th International Annual Semiconductor Conference.- Sinaia: Romania, 1993.- P. 315-318.
35. Prokopenko I.V. Analysis of the residual elastic lattice distortion and distribution of dislocation density in structural inhomogeneous crystals by anomalous transmission of X-rays // In: SPIE Proceedings

"Time-Resolved Electron and X-Ray Diffraction". - San Diego: USA, 1995. - 2521.-P.320-326.

S U M M A R Y

PROKOPENKO I.V. "Deformation fields in semiconductor single crystals and epitaxial systems at dynamic X-ray scattering".

Doctor Phys.-Math. Sciences Thesis (speciality 01.04.10 - physics of semiconductors and insulators), Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Science of Ukraine, Kiev, 1995.

30 research papers and 5 author's certificates are defended. They incorporate both theoretical and experimental investigations of the regularities in X-ray scattering and determination the characteristics of structural perfection degree in semiconductor single crystals and epitaxial systems containing distributed and localized distortions of the crystal lattice. Some novel regularities were found in the behaviour of scattering parameters for Bragg geometry in bended crystals. They enable one to analyse weak structural distortions at the surfaces of single crystals and epitaxial systems. The analysis of the X-ray Laue diffraction integral intensities for the $hk\ell$ and $\bar{h}\bar{k}\bar{\ell}$ - reflections permitted to separate localized and distributed deformation fields in structurally nonuniform crystals. The developed methods of structure diagnostics have been used to check technological processes during manufacturing of semiconductor devices.

Key words:

deformation fields, semiconductor single crystals, epitaxial systems, X-ray, dynamical scattering.

А Н Н О Т А Ц И Я

ПРОКОПЕНКО И. В. "Деформационные поля в полупроводниковых монокристаллах и эпитаксиальных системах при динамическом рассеянии рентгеновских лучей".

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-

математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков, Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев, 1995.

Защищается 30 научных работ и 5 авторских свидетельств, которые содержат экспериментальные и теоретические исследования закономерностей рассеяния рентгеновских лучей и определения характеристик структурного совершенства в полупроводниковых монокристаллах и эпитаксиальных системах, содержащих распределенные и локализованные искажения кристаллической решетки. Получены новые закономерности поведения параметров рассеяния рентгеновских лучей в геометрии Брегга от изогнутого кристалла, позволяющие анализировать слабые искажения структуры на поверхности кристаллов и эпитаксиальных систем. Анализ величин интегральных интенсивностей hk_l и $h\bar{k}l$ отражений при лауэ-дифракции рентгеновских лучей позволил провести разделение локализованных и распределенных деформационных полей в структурно неоднородных монокристаллах. Разработанные методы структурной диагностики использованы для контроля технологических процессов производства полупроводниковых приборов.

Ключові слова:

деформаційні поля, напівпровідникові монокристали, епітаксіальні системи, рентгенівські промені, динамічне розсіювання.

443574

AB 33.016