

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ

На правах рукопису

КАБАЛДІН ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОНЕОДНОРІДНОСТЕЙ РОЗПОДІЛУ  
ДОМІШКИ КИСНЮ ТА КИСНЕВМІСНИХ ДЕФЕКТІВ В  
МОНОКРИСТАЛІЧНОМУ КРЕМНІІ

01.04.07 - фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ-1995

248  
539

AB 33.078

Дисертація

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00761232 (L)

Робота виконана в Інституті

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,  
професор Шаховцов Валерій Іванович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
професор Владимиров Вадим Володимирович

доктор фізико-математичних наук,  
професор Литовченко Петро Григорович

Провідна організація: Київський університет ім. Т.Г.Шевченка.

Захист відбудеться "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1995 р. о \_\_\_ години  
на засіданні Спеціалізованої Ради Д.01.96.01 при Інституті фізики  
НАН України за адресою: 252650, Київ-28, проспект Науки, 46.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту фізики  
НАН України.

Відгуки на автореферат у двох примірниках, завірені печаткою,  
прохання надсилати на вказану адресу на ім'я вченого секретаря.

Автореферат розіслано "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1995 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради

Ішук В.А.

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

В роботі, що подається, систематизовані літературні та оригінальні дані стосовно експериментальних аспектів впливу мікронеоднорідностей просторової локалізації домішки кисню та дефектів за її участю на деякі фізичні властивості монокристалічного Si.

Актуальність теми. Монокристалічний кремній залишається основним матеріалом сучасної твердотільної мікроелектроніки. Технічні характеристики електронних приладів, створених на основі цього матеріалу, визначаються його вихідними властивостями, а також стабільністю їх в процесі експлуатації. В свою чергу, стабільність електрофізичних властивостей Si, а відповідно надійність і тривалість функціонування приладів на його основі, суттєво залежать від домішково-дефектного складу цього матеріалу.

Внаслідок подальшої мініатюризації елементів твердотільної мікроелектроніки, з переходом їх розмірів в субмікронну і нанометрову область, виникає промислова потреба в однорідному масштаба одиниць і долей мікрона і термостабільному напівпровідниковому матеріалі. Однорідність параметрів промислового напівпровідника визначається в основному однорідністю розподілу легуючої домішки та просторовою локалізацією залишкових технологічних домішок, які в процесі виробничих операцій приймають участь в утворенні електрично активних складних термічних і радіаційних дефектів.

В монокристалічному кремнії технологічно найбільш важливим домішкою в цьому відношенні є кисень. Перевищуючи в більшості практично важливих випадків по концентрації всі інші домішки, саме кисень визначає зміну електричних властивостей Si при термообробках (ТО) і під дією опромінення. Це пов'язано з тим, що атоми кисню, електрично нейтральні у вихідному стані, вносять до складу основних електрично активних термічних та радіаційних дефектів в Si. Внаслідок того, що деякі з таких дефектів (низькотемпературні кисневмісні термодонори (КТД), А-центри) можуть утворюватися за місцем локалізації цієї домішки, наявність неоднорідності в її просторовому розподілі може призвести до неконтрольованої неоднорідної зміни електрофізичних параметрів вихідного матеріалу.

Завдяки вдосконаленню технології вирощування монокристалічного кремнію на сьогоднішній день досягнуто певних результатів в керуванні макроскопічною однорідністю розподілу кисню. Так, стало можливим вирощування монокристалів Si великих діаметрів з неодно-

рідністю осьового і радіального розподілу цієї домішки не більше 15 %. Поряд з цим, досягнуто розуміння того, що кисень в кремнії здатен утворювати також і мікроскопічні неоднорідності розподілу розмірами від десятків до долей мікрона, локальна концентрація  $O_1$  в яких значно перевищує відповідне інтегральне значення цієї характеристики. Характерно, що такі неоднорідності проявляють себе лише після ТО в процесі виготовлення і експлуатації електронних пристроїв і звичайно не виявляються методами вхідного контролю. Внаслідок подальшої мініатюризації елементної бази проблема виявлення таких мікронеоднорідностей (МН) став особливо актуальною. Проте традиційні методи діагностування кремнію принципово не можуть бути застосовані для вирішення цього завдання.

Метод роботи в фізичне обґрунтування нових методів виявлення мікронеоднорідностей розподілу домішки кисню та киснемісних дефектів в монокристалічному Si та отримання достовірної кількісної інформації про параметри, що їх характеризують. В межах сформульованої задачі необхідно було вирішити наступні питання:

1. Експериментально перевірити можливість існування в монокристалічному кремнії мікроскупчень киснемісних дефектів (МСКД) та МН розподілу кисню. Визначити параметри, що їх характеризують.
2. Вивчити вплив цих неоднорідностей на оптичні, електричні та магнітні властивості  $O_2-Si$ .

3. Дослідити вплив МСКД на властивості окремих точкових дефектів, що входять до складу мікроскупчень.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. Експериментально виявлено і вивчено вплив скупчень КТД з розмірами порядку 10 мкм на малокутове розсіювання ІЧ-світла в монокристалах Si. Запропонована інтерпретація нелінійного ходу залежності інтенсивності розсіювання від кінетики накопичення термодонорів.

2. Експериментально виявлено і кількісно проаналізовано два типи анізотропії холлівської рухливості в кремнії з КТД. Запропоновано теоретичну модель, що враховує анізотропію форми мікроскупчень термодонорів (розмірами  $10^6 - 10^5$  см) та шарову мікронеоднорідність розподілу самих скупчень (з періодом порядку  $10^3$  см) в явищах руху носіїв в напівпровідниках.

3. Виявлені та проаналізовані особливості впливу мікрофлуктуацій концентрації атомів кисню на процеси преципітації кисню та утворення термодонорів при  $650^\circ C$  у нейтрально опромінену Si.

4. Експериментально отримано нелінійні польові та темпера-

турні залежності статичної магнітної сприйнятливості в Si, що містить кисневі радіаційні та термодфекти. Встановлено відповідальність А-центрів та КТД за виникнення нелінійності. Досліджено вплив зарядового стану цих дефектів на явища магнітного упорядкування кооперативного типу.

5. З аналізу температурних залежностей холлівської рухливості в опромінену Si з КТД оцінено кількість точкових дефектів (4-10) в міроскупченнях термодонорів з розмірами менше  $10^{-6}$  см.

6. Доведено, що виникнення в Si міроскупчень низькотемпературних КТД в процесі ТО та А-центрів під опроміненням зумовлено наявністю у вихідному матеріалі мікрофлуктуацій концентрації домішки кисню з розмірами та локальною концентрацією тогож порядку.

На захист вносяться наступні положення.

1. Особливістю просторової локалізації кисню та кисневмісних дефектів в Si є неоднорідність їх розподілу як в макро-, так і в мікромасштабі, що проявляється в існуванні домішкових страт, домішкових мікрофлуктуацій та міроскупчень кисневмісних дефектів.

2. Основні види кисневмісних дефектів (А-центри та КТД) в монокристалічному Si, що вирощений за методом Чохральського, здатні утворювати мікронеоднорідності розмірами  $10^{-6}$ - $10^{-3}$  см; концентрація цих дефектів в скупченнях складає  $10^{17}$ - $10^{21}$  см<sup>-3</sup>.

3. Існування в Cz-Si МСКД призводить до виникнення в цьому матеріалі додаткових оптичних, електричних та магнітних властивостей:

а) наявність міроскупчень КТД призводить до суттєвого зростання ІЧ-розсіювання в такому матеріалі внаслідок зміни діелектричної проникності матриці Si в області локалізації міроскупчень;

б) міроскупчення КТД в опромінену Si здатні суттєво зменшувати рухливість носіїв струму в області температур фононного розсіювання за рахунок неоднорідного розподілу просторового заряду;

в) наявність міроскупчень кисневмісних радіаційних та термодфектів в Cz-Si призводить до зміни магнітної сприйнятливості вихідного матеріалу, що експериментально виявляється у виникненні нелінійних польових та температурних залежностей цього параметру в опромінену або, відповідно, термооброблену монокристалічного кремнії.

Наукова та практична цінність роботи визначається тим, що більшість експериментальних та теоретичних результатів отримано

вперше і вони можуть бути використані для розробки методів керування властивостями та контролю параметрів напівпровідників в процесі технологічних операцій по виготовленню електронних приладів на їх основі. Так, досягнуте в дисертаційній роботі розуміння ролі мікронеоднорідностей розподілу кисню в процесах генерації електрично активних термодефектів дозволяє сформулювати принципово новий підхід до вирішення проблеми термостабільності Si та приладів на його основі. Він полягає у пошуку засобів підвищення однорідності розподілу кисню в кристалах кремнію на відміну від традиційного зменшення вмісту кисню вцілому.

Отримані в роботі експериментальні дані, що свідчать про існування мікроскупчень з надвисокою локальною концентрацією атомів кисню (до  $10^{21} \text{ см}^{-3}$ ), дозволяють запропонувати своє пояснення головного протиріччя класичної моделі утворення термодонорів Кейзера-Фріша-Рейса – так званого "дифузійного парадокса".

Застосована в роботі методологія експериментів по виявленню MN розподілу кисню в Si може бути використана при розробці нових методів вхідного контролю матеріалу в планарній технології.

Особистий внесок автора полягає у виконанні експериментальних досліджень, обробці їх результатів та участі у проведенні частини теоретичних обґрунтувань.

Основні методики досліджень. Під час виконання роботи було використано ряд експериментальних методів:

- вимірювання малокутового розсіювання ІЧ-світла;
- вимірювання статичної магнітної сприйнятливості;
- вимірювання ефекту Холла та питомого електричного опору;
- вимірювання часу життя неосновних носіїв струму по спаду нерівноважної фотопровідності.

Більшість застосованих методик мала високий ступінь автоматизації експерименту, а обробка отриманих експериментальних даних виконувалась за допомогою ЕОМ.

Достовірність отриманих результатів забезпечувалась використанням добре апробованих експериментальних методик і підтверджується їх відтворюваністю та збіжністю окремих результатів з даними, отриманими іншими авторами.

Апробація роботи. Матеріали дисертації доповідались і обговорювались на I Національній конференції по дефектам в напівпровідниках в С.-Петербурзі (Росія, 1992 р.), 16-й міжнародній Пекарівській конференції з теоретичної фізики в Одесі (Україна, 1994 р.), на наукових семінарах і конференціях Інституту Фізики НАН

України.

Публікації. По матеріалах дисертації опубліковано 8 друкованих робіт, список яких приведений в авторефераті.

Об'єм і структура роботи. Дисертація складається із вступу, 6 глав, висновків і списку літератури, що цитувалась. Дисертація містить 120 сторінок тексту, 2 таблиці, 36 малюнків та 160 бібліографічних найменувань.

#### Стислий зміст роботи.

У вступі приведена загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета роботи, основні результати та положення, що виносяться на захист.

В першій главі подано огляд літературних даних про фазовий стан кисню в Si, його розподіл, а також просторову локалізацію дефектів з участю цієї домішки в Чохральському і вирощеному за методом безтительної зонної плавки кремнії. На підставі аналізу цих даних було зроблено висновок про можливість в монокристалах Si неоднорідної просторової локалізації в мікромасштабі як кисню, так і дефектів за його участю. Проаналізована застосовність існуючих експериментальних методів для контролю за розподілом домішки кисню і кисневмісних дефектів в Si. На закінчення сформульовані основні завдання, які пропонувалось вирішити в даній роботі:

1. Експериментально перевірити можливість існування в монокристалічному Si мікроскупчень кисневмісних дефектів та MN розподілу кисню. Визначити параметри, що їх характеризують.

2. Вивчити вплив цих неоднорідностей на оптичні, електричні та магнітні властивості Cz-Si.

3. Дослідити вплив МСКД на властивості окремих точкових дефектів, що входять до складу цих мікроскупчень.

З метою виконання запропонованих завдань пропонувалось провести наступні конкретні експериментальні дослідження:

1. Дослідити роль кисню у виникненні оптичних неоднорідностей в монокристалах Si шляхом вивчення впливу кисневмісних дефектів, що утворюються в процесі ТО при 450°C, на малокутове розсіювання ІЧ-світла в Чохральському кремнії.

2. Вивчити вплив мікроскупчень кисневмісних термодонорів на поведінку холлівської рухливості в опроміненому і неопроміненому кремнії в інтервалі температур: 30 - 300К.

3. Дослідити вплив кисневмісних дефектів на статичну магніт-

ну сприйнятливості Cz-Si.

4. Вивчити вплив неоднорідностей просторової локалізації  $O_1$  на ефективність протікання процесів преципітації кисню і генерації термодонорів при  $650^\circ\text{C}$  в нейтронно опроміненому та попередньо відпаленому при  $450^\circ\text{C}$  кремнії.

В другій главі наведено опис досліджуваних зразків та застосованих експериментальних методик.

Для дослідження використовувались зразки монокристалічного кремнію n-типу, вирощеного за методом Чохральського з вихідним питомим електроопором  $0,3 - 75 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Вміст кисню в кристалах змінювався в межах:  $N_{O_2} = (7 \div 12) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а концентрація вуглецю не перевищувала  $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ .

Спромінення кристалів проводилось електронами з енергією  $3 \text{ Мев}$  в інтервалі флюєнсів  $10^4 - 5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$  (густина струму  $0,2 - 8 \text{ мкА/см}^2$ ,  $T_{\text{опр}} < 80^\circ\text{C}$ ), або інтегральним потоком теплових нейтронів в інтервалі доз  $1 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^8 \text{ н/см}^2$  ( $T_{\text{опр}} < 100^\circ\text{C}$ ).

3. В третій главі викладені результати досліджень впливу  $T_0$  при  $450^\circ\text{C}$  на малокутове розсіювання ІЧ-світла (МКРС) в Cz-Si. Виявлено, що така  $T_0$  в цьому матеріалі може збільшити МКРС більше, ніж на порядок. Отримано залежності нормованої максимальної інтенсивності малокутового розсіювання ( $i_0$ ), та характерного розміру розсіювачих неоднорідностей ( $R$ ) від тривалості  $T_0$ -450. Виявлено, що залежності  $i_0$  та  $R(t_0)$  мають якісно схожий, немонотонний характер з максимумом при  $t_0 = 25 \text{ год.}$  і мінімумом при  $50 \text{ год.}$  В результаті вкалізу і співставлення цих залежностей зроблено висновок, що в процесі  $T_0$ -450 виникають оптичні неоднорідності розмірами порядку  $10 \text{ мкм}$ , які є ефективними розсіювачими центрами для ІЧ-світла з довжиною хвилі  $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ . Підкреслено, що проведена  $T_0$  призводить до появи значної неоднорідності параметрів  $i_0$  та  $R$  по площі зразка, що може свідчити про суттєво неоднорідний розподіл розсіювачих центрів і, можливо, є проявом макроскопічної неоднорідності їх розподілу.

Проаналізовані причини, що могли призвести до виникнення неоднорідностей такого виду. Показано, що в ході  $T_0$ -450 до зміни вихідної електричної однорідності кристала можуть призвести лише два процеси: генерація кисневмісних термодонорів та перерозподіл просторової локалізації швидко дифундуєчих домішок (ШДД). Вивчено кінетики протікання обох процесів (експериментально досліджувались перебіг зміни часу життя неосновних носіїв струму  $\tau$  в процесі  $T_0$ -450 та кінетика накопичення КТД в цьому матеріалі). Проана-

лізовано роль ШДД у виникненні виявлених неоднорідностей. Показано, що в процесі ТО-450 відбувається перерозподіл ШДД, проте немонотонність поведінки інтенсивності малокутового розсіювання в ході такої ТО неможливо пояснити протіканням лише цього процесу.

З метою перевірки ступеня відповідальності КТД за спостережувемі особливості МКСР в термооброблених при 450°C кристалах було проведено ТО досліджуваних зразків при 520°C протягом 20 хв., що, як відомо, призводить до відпаду в них раніше введених КТД. Виявлено, що така ТО призводить до повернення вихідних оптичних властивостей матеріалу, в той час як всі значення  $\tau$  незмінно знижуються, не змінюючи при цьому характеру залежностей  $\tau(t_{70})$ . Співставлення отриманих результатів дозволило зробити висновок, що саме наявність КТД зумовлює особливості розсіювання світла, які спостерігаються в термообробленому при 450°C Si.

Грунтуючись на отриманих результатах, припущенні про наявність вихідної неоднорідності розподілу домішки кисню в Si та моделі Кайзера щодо механізму утворення КТД-450, запропоновано інтерпретацію немонотонної поведінки залежностей  $i_0$ ,  $R(t_{70})$  в процесі такої ТО в цьому матеріалі. Її суть полягає у виникненні та еволюції в процесі ТО-450 за місцем локалізації вихідних мікро-неоднорідностей ("кисневих хмаринок") мікроскупчень КТД. Саме ці мікроскупчення є безпосередньою причиною виникнення виявлених оптичних неоднорідностей в Si, а їх еволюція в ході ТО визначає зміну оптичних властивостей цього матеріалу.

Аналіз експериментальних залежностей  $i_0$ ,  $R(t_{70})$  та  $N_{TD}(t_{70})$  з використанням запропонованої інтерпретації, літературних даних з кінетики розпаду твердого розчину кисню і генерації КТД, дозволив зробити оцінки параметрів, що характеризують вихідні мікро-неоднорідності в розподілі домішки кисню та мікроскупчення термо-донорів. Згідно проведених оцінок локальна концентрація кисню у "кисневих хмаринках" перевищує  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при інтегральній концентрації кисню в цьому матеріалі  $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ; відповідна гранична концентрація КТД в скупченнях становить приблизно  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  при граничній інтегральній концентрації цих термодфектів  $1,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; концентрація термодонорних мікроскупчень не перевищує  $10^5 \text{ см}^{-3}$ . Використовуючи співвідношення, отримані з кінетики генерації КТД [1], а також передбачене в роботі [2] значення характерного розміру "кисневої хмаринки" в Cz-Si (20 мкм), теоретично розраховано характерне значення граничного розміру електронного термодонорного скупчення ( $R=12 \text{ мкм}$ ). Отримана величина

добре узгоджується з експериментальними результатами.

Четверта глава присвячена дослідженню впливу різних типів КТД, їх форми, а також характеру просторової локалізації на величину холлівської рухливості ( $\mu$ ) в опроміненому Si. Виявлено, що наявність всіх досліджуваних типів КТД в опроміненому кремнії призводить до аномальної зміни характеру температурної залежності холлівської рухливості в області температур фононного розсіювання (на кривих  $\mu(T)$  з'являється максимум з наступним різким спадом  $\mu$ ). Положення цього максимуму корелює як з концентрацією КТД, так і з флюксом опромінення. Зроблено висновок, що характерною особливістю опроміненого Si, який містить будь-який з досліджуваних типів КТД, є аномальна поведінка холлівської рухливості в області температур фононного розсіювання. Згідно [3], такий вид залежностей  $\mu(T)$  характерний для напівпровідників, що містять значні електричні неоднорідності, тому аномальне зменшення  $\mu$  в опроміненому Si з КТД в області температур фононного розсіювання пов'язано з наявністю в таких матеріалах електричних неоднорідностей, зумовлених, очевидно, мікроскупченнями КТД.

Для інтерпретації отриманих результатів запропоновано таку якісну модель. В кристалах Si існують деякі неоднорідності просторового розподілу КТД. Відсутність помітного впливу КТД на  $\mu$  при температурах фононного розсіювання до опромінення означає, що характерний розмір областей просторового заряду (ОПЗ), пов'язаних з цими неоднорідностями, менший за довжину вільного пробігу носіїв струму  $l$  при розсіюванні на фонах. Використавши, що геометричний розмір неоднорідності  $R$  менший, ніж ОПЗ, що її оточує, а  $l$  в інтервалі температур 120–180K (на якому спостерігається максимум на залежностях  $\mu(T)$  в опроміненому Si, що містить КТД) змінюється в межах  $l=10^{-6}$ – $10^{-5}$  см, оцінено граничний розмір цих неоднорідностей:  $R < l$ .

Внаслідок опромінення в Si вводяться компенсуючі радіаційні дефекти, що призводить при температурах їх перезарядки (в основному А-центрів,  $E_c - 0.17\text{eV}$ ) до збільшення ОПЗ неоднорідностей КТД (за рахунок зростання в матеріалі довжини екранування Дебая  $L_D$ ) до розмірів, здатних суттєво впливати на величину  $\mu$ . Внаслідок цього і спостерігається перегин на кривих залежностей  $\mu(T)$  в опроміненому Si (КТД). Очевидно, що геометричний розмір термодонорних неоднорідностей, що впливають на  $\mu(T)$ , по порядку величини не перевищує довжину Дебая в опроміненому Si (КТД) при температурі перегину кривих залежностей  $\mu(T)$  (в протилежному випадку зміна  $L_D$  при

компенсації РД не могла би суттєво вплинути на  $\mu$ ). Це дає можливість зробити ще одну оцінку розмірів неоднорідностей:  $R \approx L_p < 10^{-6}$  см, яка повністю узгоджується з приведеною вище і свідчить про те, що мова ведеться про мікронеоднорідності в розподілі КТД, розміри яких не більше, ніж на два порядки перевищують передбачувані розміри самих КТД [4]. Тому видавалось більш коректним і зручним перейти від терміну "мікронеоднорідність просторового розподілу КТД" до терміну "мікроскупчення КТД".

На прикладі КТД-450 кількісно проаналізовано вплив термодонорів на  $\mu$  в опроміненому Si. З цієї мети використовувався параметр  $\Delta\mu$  (відносна зміна рухливості):  $\Delta\mu = (\mu - \mu_0) / \mu_0$ , де  $\mu_0$  та  $\mu$  - рухливість до і після опромінення відповідно. Показано, що теоретичне описання експериментальної залежності  $\Delta\mu(T)$  при врахуванні розсіювання носіїв на заряджених КТД, як на точкових дефектах, та компенсації досліджуваного матеріалу радіаційними дефектами, можливе лише за умови, що довжина вільного пробігу носіїв  $l$  менша за характерний розмір довжини електричних полів  $\lambda$ , пов'язаних із КТД. Тоді для обчислення кінетичних коефіцієнтів необхідно використовувати дифузійне наближення [3] і для відносної зміни рухливості отримуємо наступну температурну залежність:  $\Delta\mu \sim T^{-3/2}$ , що повністю відповідає експерименту. Із порівняння результатів теоретичного розрахунку з експериментальними даними встановлено, що найкраще співпадіння розрахунків з експериментом спостерігається при заряді дефектів  $Z$ , рівному 4. Згідно умови нашого експерименту заряд окремого КТД дорівнював 1. Цей результат дозволяє зробити висновок, що вплив на рухливість носіїв здійснюють не окремі КТД, а їх скупчення і свідчить на користь запропонованої моделі. Однак в рамках цієї моделі неможливо пояснити суттєвого розкиду кількісних значень рухливості в зразках, вирізаних з одного кристалу, з однаковою інтегральною кількістю КТД і опромінених однаковою дозозахисною системою, що іноді спостерігався при проведенні попередніх досліджень. Висловлено припущення, що можливими причинами цього є неоднорідний розподіл самих мікроскупчень та анізотропність їх форми, що не враховувалось в експериментах із зразками довільної орієнтації. З метою з'ясування цього питання було вивчено вплив КТД на температурні залежності холлівської рухливості в зразках, орієнтованих в різних кристалографічних напрямках, в ході накопичення КТД та при наступному електронному опроміненні.

Для проведення досліджень серед вихідних зразків, вирізаних з одного монокристалу, підбирались пари зразків, орієнтовані в

площинах (IIО) та (III) з однаковими (в межах похибки методик) вихідними параметрами. Їх вихідні температурні залежності концентрації носіїв струму та холлівської рухливості попарно співпадали у всьому досліджуваному інтервалі температур.

Виявлено, що в неопромінених зразках по мірі накопичення КТД спостерігається зменшення  $\mu$  в області розсіювання на заряджених центрах, більш помітне в зразках, орієнтованих в площині (III). Виявлена особливість, не пов'язана з відмінністю темпів генерації у зразках, що порівнюються. Виявлений ефект анізотронії  $\mu$  в даному матеріалі (названий для зручності анізотронією першого типу) збільшується з тривалістю  $T_0$ , досягаючи максимального значення 17 % при  $T=300\text{K}$  ( $t_{T_0}=22$  год.).

Опромінення зразків електронами призводить, по-перше, до зміни характеру поведінки холлівської рухливості в усіх парах досліджуваних зразків. Відбувається значне зменшення  $\mu$  вже в області температур фонового розсіювання і на кривих залежностей  $\mu(T)$  виникають максимуми. По-друге, нижче  $T=170\text{K}$  відбувається зміна характеру анізотронії. Якщо до опромінення зменшення  $\mu$  було більш помітним в зразку з орієнтацією (III), то після опромінення воно стає більшим у зразку (IIО). Це явище було названо анізотронією другого типу. Її величина досягає 26 % при  $T=100\text{K}$  ( $t_{T_0}=22$  год.).

Отримані результати інтерпретуються теоретичною моделлю, що враховує роль анізотропності форми міроскупчень КТД і шаруватої неоднорідності в розподілі цих міроскупчень. Згідно цієї моделі кожне міроскупчення КТД має форму циліндра з характерними розмірами  $L$  і  $r_0$ , електростатичний потенціал якого описується виразом:

$$\phi(r) = (e^2 v^+ / \epsilon k T L) \cdot (K_0(r) / |K_1(r)|)$$
, де  $K_1(r)$  – функція Макдональда 1-го порядку,  $v^+$  – число додатньо заряджених термодонорів в такому міроскупченні.

Існування в матеріалі міроскупчень КТД, що створять "квазіодноримірні" електричні неоднорідності такого виду, призводить до відносної зміни рухливості носіїв струму:

$$\Delta\mu = \pi^{3/2} \cdot N_{\text{ск}} \cdot r_0^3 \cdot (e^2 / \epsilon L^{1/2})^2 \cdot (v^+ / T)^2$$

Теоретичні залежності  $\Delta\mu$ , розраховані за цією формулою, добре узгоджуються з експериментальними результатами. На підставі цього зроблено висновок, що до опромінення анізотронія  $\mu$  визначається анізотропністю форми міроскупчень КТД. Підкреслено, цей висновок може реалізовуватися при умові, що характерні розміри ( $L$ ,

$r_0$ ) мікроскупчень більші, ніж довжина Дебая в області температур, де спостерігається анізотропія першого типу. Це дає можливість оцінити нижню межу розмірів мікроскупчень ( $L, r_0 > 10^{-6}$  см).

Внаслідок опромінення в Si вводяться компенсуючі радіаційні дефекти, що призводить при температурах перезарядки цих дефектів до збільшення областей просторового заряду (ОПЗ) навколо мікроскупчень (за рахунок зростання в матеріалі  $L_p$ ). При певному значенні температури (або певному степені компенсації матеріалу) області просторового заряду сусідніх мікроскупчень починають перекриватись, в результаті чого вплив їх на явища переносу колективізується і стає подібним до впливу шарової неоднорідності, паралельної в даному випадку до осі росту кристала. Саме впливом таких неоднорідностей можливо пояснити зміну характеру анізотропії після опромінення. Цей випадок реалізується при умові, що довжина Дебая перевищує довжину вільного пробігу носіїв при даній температурі  $l, a$ , відповідно, і розміри мікроскупчень КТД. Це дає можливість зробити оцінку верхньої межі розмірів мікроскупчень ( $L_p > l, r; 10^{-5}$  см  $> l, r$ ).

Згідно запропонованої моделі температура ( $T_p$ ), при якій відбувається зміна характеру анізотропії  $\mu$ , визначається умовою перекриття довжин Дебая:  $(4\pi n_p^2 N_{CK})/3 = 1$ . Визначивши експериментально значення інтегральної концентрації КТД та значення довжини Дебая при температурі  $T_p$  ( $L_p$  при цій температурі не перевищує  $10^{-5}$  см), з цієї умови можливо оцінити число КТД в скупченні:  $Z=10$ .

Вплив неоднорідного розподілу дефектів на явища переносу у випадку шарової неоднорідності розглядався в роботах [5,6]. Використовуючи вирази для постійної Холла  $R_H$  та провідності  $\sigma$ , отримані в [5] для довільного розміщення векторів густини струму і магнітного поля відносно площини шарів, та моделюючи шаровий розподіл дефектів біноміальним розподілом, як це робилося у [6] (із зіставлення розрахунку за виразами для  $R_H$  та  $\sigma$  з експериментальними даними), для зразків різної орієнтації було визначено ступінь їх неоднорідності  $\gamma(T)$ , орієнтацію шарових неоднорідностей по відношенню до кристалографічних осей  $\alpha, \beta$  та період шарового розподілу мікроскупчень ( $\sim 10^{-3}$  см). Отримане значення періоду шаруватості збігається з періодом домішкових шарів  $O_1$  у такому матеріалі [7]. Зроблено висновок, що шаровий розподіл мікроскупчень КТД зумовлений ростовим шаровим розподілом домішки кисню у вихідних кристалах, орієнтація яких визначається напрямком росту кристалів.

В п'ятій главі аналізуються результати досліджень впливу кисневмісних термо- та радіаційних дефектів на магнітну сприйнятливість (МС) Чохральському кремнії. Виявлено в опроміненому електронами ( $E_e = 3\text{MeV}$ ) кремнії, а також в Si, що містить КТД-450, виникнення при температурі 80К нелінійних польових залежностей, що призводять до зменшення вихідного діамagnetизму цього матеріалу. Виявлені нелінійності зменшуються із зростанням величини магнітного поля і при значенні  $H = 4kE_{\text{ст}}$  практично виходять у насичення. Показано, що такі зміни магнітних властивостей Si зумовлені появою двох нових складових результуючої МС, не характерних для неопроміненого та нетермообробленого матеріалу. Одну з них, яка не залежить від величини поля і відповідальна за зменшення діамagnetизму в області насичення польових залежностей МС, пов'язано з парамагнітною складовою. А іншу, що відповідає за нелінійність  $\chi(H)$  в області слабких полів і характерну для матеріалів, що містять кооперативно упорядковані магнітні центри, — з складовою, відповідальною за магнітне впорядкування. Для характеристики величини кожної із цих складових МС було введено відповідно параметри  $\chi^{\text{par}}$  та  $\chi^{\text{ord}}$ . Величина  $\chi^{\text{par}}$  для кожного із досліджуваних зразків визначалась як різниця  $\chi^{\text{par}} = \chi(5kE) - \chi_L$  (де  $\chi_L$  — магнітна сприйнятливості решітки Si), а  $\chi^{\text{ord}} = \chi(0, 3kE) - \chi(5kE)$ . Експериментально досліджено залежність спостережуваних змін МС від дози опромінення та зарядового стану вторинних радіаційних дефектів (ВРД) в опроміненому кремнії, а в термообробленому — від тривалості Т0-450. Встановлено, що збільшення дози опромінення, а також зміна зарядового стану ВРД призводить до зростання як  $\chi^{\text{ord}}$ , так і  $\chi^{\text{par}}$ . В термообробленому Si до якісно аналогічної зміни цих параметрів призводить зростання тривалості Т0-450. З метою встановлення типу дефектів, відповідальних за виникнення спостережуваних нелінійностей в обох матеріалах, проводився їх відпал (основних ВРД (E- та A-центрів) — в опроміненому, та КТД-450 в термообробленому кремнії). Встановлено, що відпал A-центрів (в інтервалі 330-370°C), а також КТД-450 (при 1050°C на протязі 45 хв.) призводить до відновлення вихідних магнітних властивостей Cz-Si. Отримано температурні залежності МС для Si<КТД> та Si<ВРД>, а також аналогічні залежності ступеня електронного заповнення в цих матеріалах глибокого рівня КТД-450 і, відповідно, A-центра. Показано, що температурні залежності обох складових МС корелюють з перезарядкою глибокого рівня КТД-450 та, відповідно, A-центра. Сукупність отриманих результатів (кореляція параметрів  $\chi^{\text{ord}}$  та  $\chi^{\text{par}}$  в опромі-

неному Si з віддалом А-центрів, накопиченням А-центрів під опроміненням і ступенем заповнення рівня А-центрів, а в термообробленому матеріалі з тривалістю ТО-450 та віддалом КТД) дозволила зробити висновок про відповідальність саме А-центрів та КТД за появу при зростних температурах в цих матеріалах нелінійних польових залежностей  $\chi(H)$ . Підкреслено, що отримані залежності  $\chi(H)$  мають вигляд, характерний для матеріалів, які містять кооперативно впорядковані магнітні центри [8]. В нашому випадку це може свідчити про наявність в досліджуваному матеріалі магнітного упорядкування А-центрів та КТД відповідно. Отримані результати проаналізовано з точки зору основних механізмів магнітного упорядкування в твердих тілах [8], що дало можливість інтерпретувати їх магнітним упорядкуванням А-центрів і КТД в результаті прямої обмінної взаємодії, яка відбувається, відповідно, між А-центрами і КТД, що знаходяться в скупченнях з локальною концентрацією  $10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Аналізуючи поведінку температурних залежностей МО в цих матеріалах при відповідному ступені заповнення електронами рівня А-центра та КТД-450 з врахуванням такої інтерпретації зроблено висновок про існування критичної температури, вище якої магнітного упорядкування А-центрів та, відповідно, КТД не відбувається. Запропоновано модель, згідно якої при температурах нижчих, ніж критична в таких мікроскупченнях можливе виникнення магнітного упорядкування КТД по асперомагнітному механізму. Підкреслено, що однією з можливих причин виникнення мікроскупчень КТД в процесі ТО-450 та мікроскупчень А-центрів може бути мікронеоднорідний розподіл домішки кисню у вихідних монокристалах Si. Запропоновано пояснення "дифузійного парадоксу" утворення киснемісних термодонорів, що ґрунтується на врахуванні мікронеоднорідностей просторової локалізації термодонорів і міжвузлового кисню в кремнії.

В шостій главі викладено результати досліджень впливу неоднорідностей просторової локалізації  $O_1$  на ефективність протікання процесів преципітації кисню і генерації термодонорів при  $650^\circ\text{C}$  в нейтронно опроміненому з попереднім при  $450^\circ\text{C}$  та без попереднього відпалу кремнії. Виявлено зростання більше, ніж на порядок темпу генерації і граничної концентрації КТД-650 в ході ТО при  $650^\circ\text{C}$  внаслідок попереднього нейтронного опромінення (ПНО). Показано, що ПНО здатно скоротити інкубаційний період преципітації ІЧ-активного кисню при  $650^\circ\text{C}$  в промислового Cz-Si в 105 год. до 20 год. корельовано з дозов опромінення. Проаналізовано вплив ПНО на кінетику накопичення КТД при  $650^\circ\text{C}$  з врахуванням нейтронно стиму-

льованої трансмутації Si в Р. Виявилось, що приріст гранітної концентрації КТД експоненціально зменшується з дозою. Розглянуті можливі механізми впливу ПНО на формування КТД і прациптацію кисню. Зроблено висновок, що ПНО прискорює розпад твердого розчину кисню в Si шляхом створення додаткових центрів зародкоутворення при 650°C, в якості яких можуть виступати термостабільні при 650°C радіаційні дефекти (РД). Врахування зниження ефективності накопичення РД за рахунок анігіляції на них компонентів пар Френкеля дозволило запропонувати пояснення зниження ефективності стимуляючого впливу ПНО. Виявлено зовнішнє накопичення КТД при комбінованому введенні додаткових центрів розпаду радіаційної та термічної природи, а також збільшення характерного часу  $t_{нт}$  виходу на стаціонарне значення залежності  $N_{КТД}(t_{т0})$  для цього матеріалу. Показано, що зменшення величини  $t_{нт}$  еквівалентно зменшенню інтегральної концентрації кисню  $N_0$ . В той же час зміна ІЧ-поглинання киснем на  $\lambda=9,1$  мкм після попередньої ТО при 450°C зовсім мала, щоб пояснити збільшення  $t_{нт}$  зменшенням  $N_0$ . Отримані результати інтерпретовані з урахуванням неоднорідного розподілу домішки кисню у вихідному Si.

В заключній частині сформульовані основні результати і висновки дисертаційної роботи.

#### Основні результати.

1. Виявлено, що введення КТД призводить до посилення більше, ніж на порядок МКРС в Cz-Si. Експериментально показано, що низькотемпературна ТО при 450°C цього матеріалу призводить до виникнення в його об'ємі мікроскупчень КТД, які в свою чергу створюють оптичні неоднорідності розмірами від 9 до 15 мкм, що безпосередньо впливають на розсіювання ІЧ-світла. Зроблено оцінки локальної концентрації ТД в скупченні, що складає не менше, ніж  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а також концентрації цих скупчень, величина якої не перевищує  $10^5 \text{ см}^{-3}$ .

2. Виявлено аномальне зменшення холлівської рухливості в області фононного розсіювання в опромінену кремнію, що містить КТД різного типу. Отримані результати пояснені існуванням скупчень з кількох КТД, вплив яких на рухливість при опроміненні суттєво збільшується внаслідок зростання довжини Дебая при компенсації матеріалу радіаційними дефектами. Зроблено оцінки розмірів цих мікроскупчень ( $10^{-6}$  -  $10^{-5}$  см), а також локальну концентрацію КТД в них ( $N_{КТД} \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ).

3. Виявлено наявність двох типів анізотропії холлівської

рухливості в термообробленому при 450°C кремнії, що був підданий електронному опроміненню. Отримані результати кількісно інтерпретуються теоретичною моделлю, що враховує роль анізотропності форми мікроскупчень КТД і шаруватой неоднорідності в розподілі цих мікроскупчень. Зроблено оцінки параметрів, що характеризують ці мікроскупчення (лінійні розміри не перевищують  $10^6$  см, кількість КТД в скупченні не більше 10). Оцінено періодичність шаруватості розподілу цих мікроскупчень ( $10^3$  см). Зроблені оцінки добре узгоджуються з результатами попередніх досліджень.

4. Виявлено нелінійні польові та температурні залежності статичної магнітної сприйнятливості в опроміненому електронами або термообробленому при 450°C кремнії. Нелінійність характеру отриманих залежностей в досліджуваних матеріалах інтерпретується магнітним впорядкуванням А-центрів або, відповідно, КТД, що знаходяться в скупченнях, в результаті прямої обмінної взаємодії. Це дозволило оцінити локальну густину А-центрів та КТД в скупченні, а також концентрації цих скупчень ( $\sim 10^{21}$  см $^{-3}$  та  $10^9$ - $10^{10}$  см $^{-3}$  відповідно).

5. Виявлено сповільнення накопичення ТД при комбінованому введенні додаткових центрів розпаду радіаційної і термічної природи, а також зниження ефективності впливу ПНО на генерацію ТД і розпад твердого розчину кисню із зростанням фактора опромінення. Запропоновано пояснення цих явищ, яке враховує анігіляцію радіаційних дефектів в процесі ПНО і неоднорідний розподіл домішки кисню у вихідному Si.

#### Висновки.

1. В даний час не існує прямих керульованих експериментальних методів діагностування кремнію, здатних безпосередньо виявляти об'ємні мікрофлуктуації (МФ) концентрації домішки кисню з розмірами менше, ніж 100 мкм і величиню локального перепаду  $N_0$  більше, ніж 100 % від інтегральної. Проте комплексне використання різних непрямих але незалежних методів дослідження дозволяє з високим ступенем достовірності стверджувати, що в Si-Si існує цілий спектр мікронеоднорідностей (МН) в просторовому розподілі домішки кисню, який характеризується наступними параметрами: радіус -  $10^6$ - $10^7$  см, локальна  $N_0$  в мікронеоднорідностях може досягати величини  $10^{17}$ - $10^{21}$  см $^{-3}$ , концентрація МН  $N_{MN} = 10^5$ - $10^6$  см $^{-3}$ . Вищевказані мікронеоднорідності можуть мати складну структуру, тобто більш тротажні і розпушені можуть складатися з більш дрібних, але цільних. В той же час макроскопічний розподіл мікрофлуктуацій та-

кож неоднорідний. При цьому такі неоднорідності можуть відстежувати шари росту, що зумовлені кристалізацією в асиметричному тепловому полі. Закономірності їх розподілу імовірно визначаються домінуючим механізмом формування самих мікрофлуктуацій.

2. Можливо з достатньою впевненістю стверджувати, що МФ концентрації кисню в однієї із головних причин існування мікронеоднорідностей в розподілі основних видів кисневмісних термо- та радіаційних дефектів в Si. Як і МФ кисню, так і МН дефектів за участю атомів кисню характеризується широким діапазоном зміни таких параметрів, як розміри і концентрація, локальна концентрація дефектів, що їх складають. Ці параметри окрім вихідних характеристик МФ кисню, залежать від конкретних умов дефектоутворення. Так, при радіаційному дефектоутворенні велике значення має вид випромінювання, величина флюенса, наявність конкуруючих з киснем стоків для радіаційних вакансій. При термічному дефектоутворенні - температура Т<sub>0</sub>, концентрація та просторовий розподіл зародків для преципітації кисню.

3. Наявність МН в ряді випадків надає точковим кисневмісним дефектам деякі нові колективні властивості, невластиві їм при їх рівномірному розподілі по об'єму. Це ілюструється розглянутими вище прикладами магнітного впорядкування термодонорів і А-центрів, колективного впливу ТД на холлівську рухливість, розсіювання світла та ін. Можливо саме на шляху виявлення колективних форм впливу кисневмісних дефектів на параметри Si слід шукати нові методичні можливості для контролю МФ домішки кисню.

4. Існування МФ домішки кисню і МН кисневмісних термодонорів дозволяє пояснити протиріччя між значенням коефіцієнта дифузії  $D_1$ , який визначається з кінетики генерації КТД, і величиною  $D_0$ , що отримується з прямих експериментів по дифузії. В свою чергу, це дозволяє відмовитися від використання уявлень про прискорену дифузії кисню в області 450°C при створенні моделей КТД.

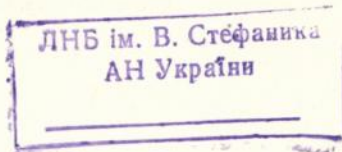
#### Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Неймаш В.Б., Помозов Д.В., Шаховцов В.И., Кабалдин А.Н., Цмоць В.М. О влиянии нейтронного облучения на генерацию термодоноров и преципитацию кислорода в кремнии при 650°C // ФТП.-1998. - 27, вып.10. С.1651-1656.
2. Кабалдин А.Н., Неймаш В.Б., Цмоць В.М., Шаховцов В.И., Батушина А.В., Воронков В.В., Воронкова Г.И., Калыужкин В.П. "Влияние

- термодоноров на малоугловое рассеяние света в кремнии" //УФЖ.- 1993.- 38, №1. С.34-39.
3. Неймаш В.Б., Помозов Ю.В., Кабалдин О.М., Мельник В.И., Шаховцов В.И., Цмоць В.М. Особливості генерації термодонорів і преципітації кисню при 650°C в нейтронно опромінену кремній. //УФЖ.- 1994.- 39, №3. С.310-316.
4. Кабалдин О.М., Неймаш В.Б., Цмоць В.М. Шаховцов В.И., Штим В.О. Особливості поведінки магнітної сприйнятливості опроміненого кремнію //УФЖ.-1995.-.40, №3. С.218-221.
5. Кабалдин О.М., Неймаш В.Б., Цмоць В.М. Штінар Л.І. Механізми впливу термодонорів на холлівську рухливість у Si //УФЖ.- 1995.- 40, №10. С.1079-1082.
6. Кабалдин А.Н., Малко Л.Р., Неймаш В.Б., Помозов Ю.В. Особенности генерации термодоноров и преципитации кислорода в нейтронно облученном кремнии. В сб.: Тез. докл. I национальной конф. "Дефекты в полупроводниках". Санкт-Петербург, апрель 1992 г. С.154.
7. Кабалдин А.Н., Неймаш В.Б., Шаховцов В.И., Штінар Л.И. Структура и свойства термодоноров в кремнии. // Тез. докл. 16-й Международной Пекаревской конференции по теоретической физике. Одесса, сент. 1994. С.48.
8. Кабалдин А.Н., Неймаш В.Б., Цмоць В.М., Штим В.С., Шаховцов В.И. Асперомагнетизм А-центров в кремнии. /там же, С.49/.

Список літератури, що цитувалась:

1. Боронков В.В., Воронкова Г.И., Калинин В.П., Мурина Т.М., Назаров Т. и др. //ФТП.- 1983.- 17, вып.12.- С.2137-2142.
2. Kaiser W., Frish H.L., Reiss H. //Phys.Rev. - 1958.-112.- P.1546
3. Пекар С.Л. //ФТТ.-1966.-8, вып.4.- С.1116-1121.
4. Bourget A. //J. Met. Soc. AIME.-1985.- P.129-146.
5. Штінар Л.И., Ясковец И.И. //УФЖ.-1982.- 27, №2.- С.256-258.
6. Vinetskiĭ V.L., Kukhtarev N.V. //Solid State Commun. - 1973.- 13.- P.31-34.
7. Ильчишин В.А., Степченко В.Н. //Электрон.техника. Сер. Материалы (6).- 1982.-Вып.9.-С.3-9; 1983. -Вып.2. -С.3-9.
8. Херд К.М. //УФН.-1984.- 142, вып.2.- С.331-335.



Kabal'din A.N. Investigation of micrononhomogeneities distribution of oxygen impurity and defects related with oxygen in monocrystalline silicon. Thesis for a Physics & Mathematics candidate's degree on the speciality 01.04.07 - solid state physics, Institute of Physics National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1995.

Literary and original data about influence of micrononhomogeneous distribution of oxygen and defects related with this impurity upon the some physical properties of Si are sistemized in present work. The increase of small-angle light scattering and static magnetic susceptibility in silicon containing defects related with oxygen and also the anomalous reduction of Hall mobility  $\mu$  in electron irradiated Si containing the oxygenous thermal donors (OTD) were found. The influence of OTD on the  $\mu$  in the same Si with different crystallographic orientations was experimentally studied. Two kinds of anisotropy of  $\mu$  that is caused by OTD were discovered. The experimental data are interpreted with existence of microaccumulations of the oxygen containing defects resulting of the nonhomogenous distribution of oxygen in initial Cz-Si. The theoretical model that takes into account the anisotropy form of OTD microaccumulations and their flaky inhomogeneity is proposed. Parameters of these microaccumulations are estimated.

Кабалдин А.Н. Исследование микронеоднородностей распределения примеси кислорода и кислородсодержащих дефектов в монокристаллическом кремнии.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела, Институт физики НАН Украины, Киев, 1995.

В работе систематизированы литературные и оригинальные данные, касающиеся экспериментальных аспектов влияния микронеоднородностей пространственного распределения примеси кислорода и кислородсодержащих дефектов на некоторые физические свойства монокристаллического Si. Обнаружено, что наличие в Cz-Si кислородсодержащих дефектов приводит к увеличению малоуглового ИК-рассеяния и магнитной восприимчивости, а облучение такого материала, содержащего кислородные термодоноры (КТД), - к аномальному уменьшению холловской подвижности носителей тока  $\mu$ . Экспериментально исследовано и численно проанализировано влияние КТД на  $\mu$  в монокристаллах Si различной кристаллографической ориентации. Обнаружено два типа анизотропии  $\mu$ , обусловленной влиянием КТД. Полученные результаты интерпретируются наличием микроскоплений кислородсодержащих дефектов, отслеживающих пространственное распределение примеси кислорода в исходном Si. Предложена теоретическая модель, учитывающая роль анизотропности формы микроскоплений КТД и слоистой неоднородности в распределении этих микроскоплений. Оценены параметры, характеризующие данные микроскопления.

**Ключові слова:** кремній, кисень, кисневмісні дефекти, кисневмісні термодонори, микронеоднорідність, мікроскупчення.

КАБАЛДІН ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОНЕОРІДНОСТЕЙ РОЗПОДІЛУ ДОМІШКИ  
КИСНО ТА КИСНЕВМІСНИХ ДЕФЕКТІВ В МОНОКРИСТАЛІЧНОМУ  
КРЕМНІІ

Підписано до друку 02.08.1995. Формат паперу

Папір офсетний 72 гр/м<sup>2</sup>. Офсетний друк. Ум.-друк.

листів 1,2. Об.-вид.листів 0,8. Тираж 100. Зам.35

Безкоштовно.

---

Інститут фізики НАН України, ВНГІ.  
252650, Київ-22, ДСП, проспект Науки, 46.



810.88 8H

443592

АВ 33.018

БЕЗКОШТОВНО