

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ

На правах рукопису

ЯШНИК ВІКТОР ІВАНОВИЧ

ДЕФЕКТОУТВОРЕННЯ В КРЕМНІІ, ЛЕГОВАНОМУ  
ЕЛЕМЕНТАМИ ІУ ГРУПИ

01.04.07 - фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 1994

548 +  
539

AB 31. 496

Робота виконана в Інституті фізики НАН України

Наукові керівники: доктор фізико-математичних наук  
професор Шаховцов В.І.  
кандидат фізико-математичних наук  
Хіруненко Л.І.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук  
професор Кіз А.Є.  
доктор фізико - математичних наук  
Блонський І.В.

Провідна організація: Інститут напіпровідників НАН України

Захист відбудеться " \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1994р. о \_\_\_  
години на засіданні Спеціалізованої Ради К 016.04.01 при  
Інституті фізики НАН України за адресою: 252650, Київ - 28,  
проспект Науки, 46.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотечі Інституту  
фізики НАН України.

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

Автореферат розіслано " \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1994р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради  
Пржонська О.В.

ЛНБ України ім. В. Стефаника  
00755906 (W)

ЛНБ ім. В. Стефаника

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність теми. Вивчення процесів утворення та взаємодії дефектів як ростового походження, так і виникаючих в результаті різноманітних обробок (термічна, радіаційна та ін.) є одною з найбільш актуальних проблем фізики твердого тіла. Вирішення цих питань важливе як з наукової, так і прикладної точок зору, оскільки найважливіші властивості напівпровідникових матеріалів суттєво залежать від їх дефектного складу.

Останнім часом значно зріс інтерес до легування напівпровідників ізовалентними домішками (ІВД). Пов'язане це з тим, що такі домішки, являючись, як правило, електрично пасивними, можуть суттєво впливати на стан ансамблю точкових дефектів кристалу та процеси дефектно-домішкової взаємодії при радіаційних та термічних обробках. Гім самим відкриваються нові можливості для використання такого легування як одного з методів керування властивостями напівпровідникових матеріалів.

Незважаючи на значну кількість проведених досліджень, до теперішнього часу недостатньо вивчені процеси дефектно-домішкової взаємодії в Si з ІВД, вплив ІВД на термічне, радіаційне дефектоутворення та процеси трансформації точкових радіаційних дефектів (РД) в Si. Так спостерігаються істотні розбіжності в отриманих експериментальних даних, що призводить до невідповідності, а іноді протилежного, трактування процесів, які відбуваються в матеріалі при відповідних обробках (термічних, радіаційних та ін.). В силу цього необхідним є проведення подальших досліджень в даному напрямі на основі аналізу попередніх експериментальних результатів.

Мета роботи. Основною метою даної роботи було вивчення впливу ІВД на процеси термічного, радіаційного дефектоутворення та міждомішкової взаємодії в кремнії.

В рамках поставленої задачі необхідно було:

1. Провести дослідження впливу ІВД на оптичні, енергетичні, електричні та механічні параметри кремнія.
2. Дослідити особливості термічного дефектоутворення в кристалах кремнію, леггованих та леггованих ІВД германієм.
3. Дослідити вплив ІВД германієм на процеси радіаційного дефектоутворення в кремнії.
4. Вивчити процеси трансформації РД при відпалі кремнія та кремнія, леггованого германієм.

Наукова новизна. В дисертаційній роботі вперше отримані такі основні результати:

- Показано, що неоднорідне розширення ліній поглинання воднеподібних центрів в кремнії, леггованому ізовалентними домішками, обумовлене виникненням пружних полів із-за нерівності ковалентних радіусів атомів матриці та ІВД;

- Виявлено ряд нових типів термодонорних (ТД) центрів в Si, леггованому Ge. Ідентифіковані лінії, що належать цим центрам у наближенні теорії ефективної маси. Пояснено підвищення термостабільності Si при легуванні його германієм;

- Запропоновано використання ізотопічно збагаченого  $^{74}\text{Ge}$  та  $^{76}\text{Ge}$  як модельного матеріала для вивчення природи та електронної структури дефектів у природному Ge. Отримана тонка структура спектрів ЕПР радіаційних дефектів ( $V_2^-$ - та А-центрів) в  $^{74}\text{Ge}$ ;

- Виявлено, що незалежно від температури опромінення легування Si германієм приводить до зменшення ефективності введіння основних вторинних РД. Проведено теоретичний роз-

гляд можливих реакцій в припущенні, що атоми германія є центрами анігіляції геврвинних РД;

- Виявлені три типи нових дефектів, які виникають при відпалі опроміненого Si (Si-Ge). Показано, що до їх складу входять вакансія та кисень. Визначені енергії активації відпаду.

На захист виносяться наступні положення.

Модель процесу зниження ефективності утворення термоіонізаторів в Si, легваному германієм.

Ефект подовження генерації вторинних РД в Si, легваному германієм, у припущенні, що атоми Ge діють як центри анігіляції компонент пар Френкеля незалежно від температури опромінення.

Використання ізотопічно збагачених монокристалів Ge як модельних об'єктів для вивчення дефектів в кристалах з природним ізотопним складом.

Існування нових типів кисневміслючих дефектів, які виникають внаслідок трансформації РД при відпалі Si (Si-Ge).

Практична цінність роботи.

Ряд наукових результатів, отриманих в дисертаційній роботі, щодо кремнія, легваного ІВД, використані на ЗТМК (м.Запоріжжя) та ВО "Тама" (м.Запоріжжя), що підтверджується актом впровадження, а також можуть бути застосовані при розробці нових технологічних процесів в умовах серійного виробництва напівпровідникових приладів для підвищення термічної та радіаційної стійкості кремнія та збільшення відсотку виходу придатних приладів та ІМС на підприємствах мікроелектронної галузі.

Висок автора. Всі дослідження, результати яких викладені в даній роботі, виконані при безпосередній участі авто-

ра в плануванні та постановці експерименту, в експериментальних вимірах, в обробці результатів та їх обговоренні.

Основні методи досліджень. Для проведення комплексних досліджень було використано ряд експериментальних методів, у тому числі:

- ІЧ Фур'є-спектроскопія високої роздільної здатності;
- електронний парамагнітний резонанс;
- виміри ефекту Хола та питомого електричного опору;
- оптична електронна мікроскопія.

Більшість застосованих методик мали високий ступінь автоматизації експерименту. Обробка отриманих експериментальних даних виконувалась за допомогою ЕОМ.

Достовірність отриманих результатів забезпечується використанням добре апробованих експериментальних методик, відтворюваністю результатів і підтверджується збіжністю окремих результатів в результатами інших авторів.

Апробація роботи. Матеріали дисертації докладались на наукових семінарах Інститута фізики НАН України, Республіканських семінарах в радіаційній фізиці твердого тіла (Київ, 1986-1991р.), Всесоюзних семінарах в радіаційній фізиці та технології напівпровідників (Новосибірськ, 1986-1988р.), Міжнародній конференції по дефектам в напівпровідниках в Будапешті (Венгрія, 1988р.), Всесоюзній конференції з фізико-хімічних основ легування напівпровідникових матеріалів (Москва, 1988, 1990р.), Міжнародній конференції по радіаційному матеріалознавству в Алушті (СРСР, 1989р.), V міжгалузевому семінарі "Проблеми створення напівпровідникових приладів, ІО та РЕА на їх основі, стійких до впливу зовнішніх факторів" (Петрозаводськ, 1991р.), I Національній конференції по дефектам в напівпровідниках (С.-Петербург, 1992р.), Міжнарод-

ній конференції по теорії напівпровідників в Одесі (Україна, 1984р.) та ін.

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 11 друкованих роботах.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, шести глав, висновків і списку цитованої літератури.

Дисертація містить 101 сторінку тексту, 2 таблиці, 47 малюнків та 211 бібліографічних найменувань.

#### Стислий зміст роботи.

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

В першій главі приведено огляд літературних даних, отриманих при вивченні впливу ізовалянтного легування на енергетичну структуру, електрофізичні і оптичні властивості кристалів кремнію, та на процеси термічного і радіаційного дефектоутворення. Особливу увагу приділяється розгляду кремнія, легovanого ІВД германія.

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

Для досліджень використовувались вирощені методом Чохральського монокристалічні зразки п- і р-типу кремнію та кремнію, легovanого германієм та оловом. Концентрація Ge та Sn складала  $3 \cdot 10^{18} + 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  та  $3 \cdot 10^{18} + 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , відповідно. Вміст кисню та вуглецю в кристалах змінювався в наступних межах:  $N_O = (2+9) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_C = (1+2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Опромінення кристалів проводилося електронами з енергією 3 МеВ та інтегральним потоком теплових нейтронів до

$5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ .

Третя глава присвячена вивченню впливу ізовалянтних домішок Sn та Se на напівширину та форму смуг поглинання водневоподібних центрів (ВЩ) фосфору і бору в кремнії, а також на деякі властивості кремнія, такі як ширина забороненої зони, рухомість носіїв струму, питомий електричний опір та інші.

Показано, що при легуванні кремнію ІВД має місце неоднорідне розширення смуг поглинання ВЩ, обумовлене виникненням внутрішніх деформаційних полів із-за незбіжності ковалентних радіусів атомів матриці Si та ІВД. Виявлено, що величина неоднорідного розширення смуг ВЩ в кремнії зростає зі збільшенням ковалентного радіусу атомів ІВД при їх рівних концентраціях. Для залежності напівширини смуг поглинання ВЩ від концентрації ІВД досить добре виконується співвідношення:

$$H = \sqrt{N \cdot |A|}, \quad (1)$$

де  $N$  - концентрація дефектів, які створюють деформаційні напруги,  $A$  - деформаційний заряд цих дефектів.

В результаті співставлення деформаційних зарядів ІВД, основних технологічних домішок - кисню і вуглецю, та їх відповідних концентрацій робиться висновок, що при  $N_{\text{Ge}} > 10^{19} \text{ см}^{-3}$  та  $N_{\text{Sn}} > 10^{18} \text{ см}^{-3}$  величина пружних полів, які створюються в Чохральському Si, легуваному ІВД, визначається головним чином домішками Ge та Sn.

Показано, що локальні напруги, які виникають при введенні атомів ІВД в ґратку, можуть приводити до зміни ряду фізичних характеристик кремнію. Так для Si, легуваного германієм, виявлена сингулярність поведінки залежності ширини забороненої зони Si від концентрації Ge в області  $N_{\text{Ge}}$

0.17 ат%.

При легуванні германієм, починаючи з концентрацій вищих за  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , спостерігається зменшення рухливості носіїв струму в Si, що підтверджує короткодіючий потенціал ІВД 1, відповідно, свідчить про малість потенціалу розсіювання ІВД. При  $N_{\text{Ge}} \geq 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  спостерігається поступове зливання мікротвердості кремнія від 1300 (Si) до 1240  $\text{кг/мм}^2$ . При  $N_{\text{Ge}} \geq 10^{20} \text{ см}^{-3}$  спостерігається випадіння другої фази з значенням мікротвердості  $\approx 990 \text{ кг/мм}^2$ , яке характерне для Ge. Цей висновок підтверджується також електронно - мікроскопічними дослідженнями.

Крім того, виявлено значне підвищення однорідності розподілу питомого електроопору по діаметру та довжині валику при легуванні Si германієм.

В четвертій главі розглядаються процеси термічного ефектоутворення в Si та впливу на них легування германієм. Виконувались дослідження спектрів ІЧ поглинання кристалів Si та Si-Ge, які піддавались термообробці при  $T = 450^\circ\text{C}$  від 1 до 60 годин. Вивчався нульовий зарядовий стан дев'яти типів низькотемпературних термодонорів (ІД1-ІД9), який проявляється в спектрах ІЧ поглинання в області  $520 \pm 380 \text{ см}^{-1}$ . В результаті проведених досліджень виявлені деякі особливості спектрів поглинання ІД центрів як в Si, так і в Si, легуваному Ge.

При вивченні спектрів поглинання ІД в кремнії виявлено розщеплення на дві компоненти смуг поглинання, які відповідають переходам  $1s \rightarrow 2r_{\pm}$  та, для деяких ІД центрів, переходам  $1s \rightarrow 3r_{\pm}$ . Величина розщеплення змінюється від  $0.5 \text{ см}^{-1}$  для ІД1 до  $1.5 \text{ см}^{-1}$  для ІД6, що свідчить про зміну взаємодії з оточуючою ґраткою при збільшенні номеру ІД. Одночасно

спостерігалась несиметричність як розщеплених смуг, так і смуг, що відповідають переходам  $1s - 2p_0$  для стану  $1D^0$ . Проведений машинний аналіз смуг поглинання дав змогу виділити їх трьохкомпонентну структуру. Аналогічна триплетна структура отримана і для смуг поглинання, які відповідають переходам  $1s - 2p_{\pm}$  стану  $1D^+$ .

Відомо, що в кремнії для ВЩ внаслідок долино-орбітальної взаємодії основний  $1s$ -стан розщеплюється на синглет ( $A_1$ ), триплет ( $T_2$ ) та дублет ( $E$ ). Враховуючи, що низькотемпературні ІД є геліє(водне)подібними центрами для них за рахунок долино-орбітальної взаємодії також повинне спостерігатися розщеплення основного стану на шість підрівнів. Оскільки взаємодія з долинами зони провідності для ІД в Si набагато слабкіша, ніж для інших центрів, що описуються в наближенні теорії ефективної маси, то, напевне, і величина розщеплення рівнів  $1s$  для всіх типів ІД також буде набагато менша, ніж, наприклад, для фосфора в кремнії. У зв'язку з цим зроблено висновок, що виявлена нами трикомпонентна структура смуг поглинання ІД обумовлена розщепленням основного стану на  $A_1$ ,  $T_2$  і  $E$  внаслідок долино-орбітальної взаємодії.

При дослідженні спектрів ІЧ поглинання ІД центрів в Si, легуюваному германієм в області концентрацій  $N_{Ge} = 3 \cdot 10^{18} + 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , виявлено, що вигляд спектру поглинання низькотемпературних ІД в Si-Ge суттєво залежить від концентрації германія. Так при підвищенні концентрації германія більше, ніж  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , спостерігається поступове зменшення інтенсивності смуг поглинання ІД, характерних для нелегованого Si, при одночасному більш повільному збільшенні інтенсивності заново виникаючих смуг, що особливо яскраво проявляється в області поглинання, що відповідає центрам ІД3, ІД4 та ІД7.

При  $N_{Ge} = 2.6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  виявлено збільшення площі під смугами поглинання, які відповідають ІД<sub>3</sub> та ІД<sub>4</sub>, в Si-Ge приблизно в 1.5 рази порівняно з Si, який підлягав аналогічній термообробці. Поява в спектрах нових смуг поглинання та зміка площі під смугами дають можливість припустити існування в досліджуваних кристалах Si-Ge нових типів ІД центрів порівняно з нелегованим Si. Використовуючи розрахунки, виконані у наближенні теорії ефективної маси, було ідентифіковано як найменше три групи смуг поглинання, які не спостерігалися раніше і належать різним типам ІД.

При підвищенні концентрації германія понад  $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  має місце перекриття смуг поглинання, що перешкоджає спостереженню смуг, які належать різним центрам. В той же час значно зменшується сумарна концентрація ІД порівняно з нелегованим Si. При  $N_{Ge} \sim 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  спектр поглинання перетворюється в широкі безструктурні смуги при одночасному різкому спаді їх інтенсивності. Тобто в кристалах Si-Ge при збільшенні концентрації Ge, з одного боку, зникає ефективність введення ІД, характерних для чистого Si, і, з другого боку, більш повільно утворюються нові ІД центри (нові зародки). Конкуренція цих двох процесів, напевне, і приводить до підвищення термічної стійкості кремнія. Вплив германія на процеси утворення ІД центрів в Si може бути обумовлений корельованим розподілом атомів германію та кисню - кисень розташовується в місцях розтягнення ґратки і має місце взаємна компенсація деформаційних зарядів Ge та O.

Вивчався також вплив легування германієм на ефективність утворення так званих мілких термодонорів (МІД), які утворюються на початкових стадіях термообробки (до 2 годин) при  $T = 450^\circ\text{C}$  і проявляються в області ІЧ поглинання 290 -

$220 \text{ см}^{-1}$ . Показано, що в кристалах Si-Ge з концентрацією германію -  $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  смуги поглинання МІД суттєво слабкіші по інтенсивності або ж зовсім відсутні порівняно з нелегованим Si. Це свідчить на користь того, що легування Si германієм приводить до зниження ефективності введення МІД, які утворюються на початкових стадіях термообробки.

В п'ятій главі вивчаються процеси радіаційного дефектоутворення в кремнії, германії та в кремнії, легovanому германієм.

Природа та електронна структура дефектів в природному п'ятиізотопному Ge майже не досліджені внаслідок непридатності резонансних методик ІЧ поглинання та ЕПР для їх вивчення. Для дослідження процесів радіаційного дефектоутворення в природному Ge запропоновано використання ізотопічно збагаченого Ge як модельного матеріалу. При цьому спочатку досліджено вплив ізотопічного заміщення ( $^{74}\text{Ge}$  та  $^{76}\text{Ge}$ ) на коливні (фононні) спектри Ge, оскільки основні РД проявляються саме в цій області спектру. Виявлено асув комбінаційних частот в низькоенергетичну область. Розраховані зміни енергій фононів при ізотопічному заміщенні та проведено співставлення з отриманими експериментальними результатами.

Для ізотопічно збагаченого  $^{74}\text{Ge}$ , опроміненого електронами, отримана тонка структура спектрів ЕПР радіаційних дефектів (близько 23 ліній). Комплексні дослідження спектрів ЕПР та ІЧ поглинання дали можливість виділити смуги ЕПР, які відповідають  $A-1 V_2$ -центрам в Ge. Проведені розрахунки  $g$ -факторів.

В роботі проведено дослідження впливу рівня легування та температури опромінення на процеси радіаційного дефектоутворення в кристалах Si-Ge.

Особливий інтерес представляли дослідження ефективності введення радіаційних дефектів в кристалах Si-Ge, опромінених при  $T \leq 100\text{K}$ . При таких температурах атоми Ge ефективно захоплюють вакансії V з утворенням термічно стабільного комплексу GeV, існування якого може суттєво впливати на процеси дефектно-домішкової взаємодії в Si. В роботі вивчалися спектри поглинання в області 835 (A-центри) та 5555 ( $V_2$ )  $\text{cm}^{-1}$ . Слід відмітити, що смуги поглинання 5555  $\text{cm}^{-1}$  в умовах даного опромінення відповідає два дефекти -  $V_2$  та  $V_2I$ . Центр  $V_2I$  відпадається при  $T \geq 140\text{K}$  і відповідно при цій температурі оцінюється їх концентрація.

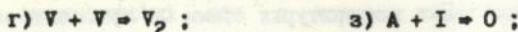
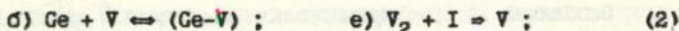
Показано, що для кристалів Si-Ge, опромінених при  $T \leq 100\text{K}$ , майже відсутні A-центри, а концентрація ( $V_2 + V_2I$ ) менша, ніж для нелегованого Si, тобто основна частина вакансій витрачається на утворення комплексів GeV. При ізохронному відпалі центрів GeV до 280K спостерігається поступове збільшення концентрації A-центрів і деяке підвищення вмісту  $V_2$ , але кінцева концентрація дефектів виявилась значно нижчою, ніж у спеціально нелегованому Si. Зниження ефективності введення вторинних РД спостерігалось раніше і в кристалах, опромінених при  $T = 300\text{K}$ , що пояснювалось в рамках моделі, згідно якої атоми Ge є центрами анігіляції первинних РД. Аналогічне припущення було прийняте і для умов даного експерименту.

В такому припущенні в роботі теоретично описані ефективності введення вторинних РД, які спостерігаються на експерименті.

Враховуючи основні реакції при низькотемпературному опроміненні кристалів Si-Ge

$$\text{а) } e \rightarrow I, V, V_2 ;$$

$$\text{д) } V_2 + I \rightarrow V_2I ;$$



була складена відповідна система кінетичних рівнянь, яка була вирішена в квазістационарному наближенні ( $dN_V/dt = dN_I/dt = dN_G/dt = 0$ ) з врахуванням припущень, відповідаючих експериментальним даним :

$$\chi_{GI} N_G N_I \gg \frac{N_G}{\tau_G} ; \quad \chi_{CeV} N_G N_V \gg \frac{N_G}{\tau_G} ; \quad \chi_{GeV} N_G N_V \gg \chi_{VV} N_V^2 ; \quad (3)$$

$$\chi_{GeV} N_G N_V \gg \chi_{OV} N_O N_V ; \quad \chi_{GI} N_G N_I \gg \chi_{AI} N_A N_I ; \quad \lambda_1 \gg \chi_{V_2 I} N_{V_2} N_I .$$

де  $N$  - концентрація відповідного дефекта,  $\chi_{ij}$  - ймовірності реакцій між частками  $i$  та  $j$ ,  $\tau$  - час життя відповідного дефекта,  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  - швидкості утворення первинних РД  $I$ ,  $V$  і  $V_2$ ,  $G$  - центр GeV.

Отримані наступні залежності ефективностей введення А-центрів та дивакансій від  $N_{Ge}$  в кристалах Si-Ge:

$$N_A = \frac{\lambda_1 \chi_{OV} N_O}{2 \lambda_2 \tau_I \chi_{AI} \chi_{CeV}} \cdot \frac{1}{N_{Ge}} ;$$

$$N_{V_2} = \frac{1}{2 \tau_I \chi_{V_2 I}} + \frac{\lambda_1^2 \chi_{VV}}{2 \lambda_2 \tau_I \chi_{V_2 I} \chi_{GeV}^2} \cdot \frac{1}{N_{Ge}^2} ; \quad (4)$$

$$N_{V_2 I} = \lambda_2 \tau_{V_2 I} + \frac{\lambda_1^2 \tau_{V_2 I} \chi_{VV}}{\chi_{GeV}^2} \cdot \frac{1}{N_{Ge}^2} .$$

Враховуючи, що згідно з експериментальними даними основним дефектом при низькотемпературному опроміненні є центр  $V_2 I$ , була побудована залежність їх концентрації від  $N_{Ge}$ . Одержано досить добре погодження експериментальних даних з

отриманою залежністю. Це свідчить на користь моделі, згідно якої атоми Ge при опроміненні є центрами анігіляції первинних РД.

В роботі проведено дослідження ефективності введення А- та  $V_2$ -центрів для кристалів Si-Ge, опромінених при T-300K. Вивчалися монокристали p-типу з  $N_{Ge} = 2 \cdot 10^{18} + 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Показано, що для даних умов опромінення  $N_A \sim 1/N_{Ge}$ , а  $N_{V_2} \sim 1/N_{Ge}^2$ . На основі отриманих експериментальних даних побудовані залежності концентрацій А- та  $V_2$ -центрів від  $N_{Ge}$ , які добре узгоджуються з теоретичними розрахунками.

Таким чином, проведені дослідження показали, що, незалежно від умов опромінення, процес зниження ефективності введення дефектів як вакансійного, так і міжвузлового типу задовільно пояснюється в припущенні, що атоми Ge є центрами анігіляції первинних РД в Si.

Шоста глава присвячена вивченню впливу домішки Ge на процеси трансформації точкових РД при відпаді кристалів Si, опромінених електронами флюенсом  $\Phi \gg 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ .

При дослідженні відпаду дивакансій в кристалах Si-Ge, опромінених електронами, виявлено підвищення їх термічної стабільності порівняно з нелегованим Si. Ефект пояснюється з точки зору підвищення енергії зв'язку  $V_2$ -центра в полях пружних деформацій, які виникають при легуванні Si германієм. Проведена оцінка величини гідростатичного тиску P вздовж  $V_2$ -центра. При  $N_{Ge} = 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$   $P = 4 \cdot 10^4 \text{ Н/см}^2$ , що відповідає збільшенню енергії активації відпаду дивакансій на 0.09 еВ.

При відпаді опроміненого електронами Si виявлена складна структура в області поглинання А-центрами, а саме спостерігається відщеплення приблизно 10 компонент від основної

смуги А-центра при температурах відпаду  $290 + 370\text{K}$ .

Виявлено, що легування Si германієм до концентрацій  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  приводить до суттєвого зниження температури появи структури в області А-центра - приблизно на  $80^\circ\text{C}$  та деякого перерозподілу інтенсивностей компонент. Зроблено припущення, що механізм утворення нових центрів в значній мірі визначається наявністю пружних полів в кристалах. Цей висновок підтверджено при вивченні Si, опроміненого тепловими нейтронами флюенсом  $\Phi \geq 5 \cdot 10^{17} \text{ в} \cdot \text{см}^{-2}$ , коли, як відомо, утворюються області розупорядкування, які приводять до значних полів пружних деформацій в кристалах. В цьому випадку також спостерігалось зниження температури появи нових центрів на  $-80^\circ\text{C}$ .

Проведені виміри концентрацій кисню, А- і  $V_2$ -центрів, площ під кривими дозволили зробити висновок, що структура виникає внаслідок появи нового типу центрів, до складу яких входить вакансія та кисень. Використовуючи ізотермічні відпали, визначені енергії активації відпаду цих центрів і показано, що їх існує щонайменше три типи з енергіями активації  $E_1 = 2.35$ ;  $E_2 = 2.59$  та  $E_3 = 2.68 \text{ eV}$ .

В заклученні сформульовані основні висновки роботи:

1. Показано, що неоднорідне розширення смуг поглинання воднеподібних центрів в кремнії, легуваному ізовалентними домішками, обумовлене виникненням пружних полів внаслідок незбіжності ковалентних радіусів атомів матриці та ІВД.

2. Виявлено розщеплення смуг поглинання низькотемпературних термодонорних центрів на дві (або три) компоненти, що обумовлено розщепленням їх основного стану за рахунок доли-орбітальної взаємодії.

3. Виявлено та ідентифіковано появлення ряду нових типів термодонорних центрів в Si, легуваному Ge, при одночас-

ному подавленні процесів генерації термодонорів, характерних для Si. Ефект підвищення термостабільності Si при легуванні його германієм пояснюється конкуренцією цих двох процесів.

4. Запропоновано використання ізотопічно збагаченого Ge як модельного матеріалу для вивчення природи та електронної структури дефектів у природному п'ятиізотопному Ge. Отримана тонка структура спектрів ЕПР радіаційних дефектів в  $^{74}\text{Ge}$ .

5. Виявлено, що легування Si германієм приводить до зниження ефективності введення дефектів вакансійного і міжвузлового типу при опроміненні в області температур як стабільності центру GeV, так і поблизу області його відпаду. Проведено теоретичний розгляд схеми можливих реакцій і показано, що атоми германія є центрами анігіляції первинних РД.

6. Виявлені три типи нових дефектів, які виникають при відпаді опроміненого Si та Si-Ge. Показано, що до їх складу входять вакансія та кисень. Визначені енергії активації відпаду виявлених центрів:  $E_1=2.35$ ;  $E_2=2.59$  та  $E_3=2.88$  еВ.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Мизрухія Л.В., Хируненко Л.И., Шаховцов В.И., Шинкаренко В.К., Яшник В.И. Упругие напряжения в Si с электрически пассивными примесями. // ФТП. 1989. Т.23. В.4. С.704-708.

2. Italyantsev A.G., Khirunenko L.I., Mordkovich V.N., Shakhovtsov V.I., Yashnik V.I. The Influence of Germanium on the Formation and Annealing of Radiation Damage in Silicon. // Mater. Science Forum. 1989. V.38-41. P.1163-1169.

3. Помозов Д.В., Хируненко Л.И., Шаховцов В.И., Яшник В.И. Трансформация точечных дефектов при отжиге Si и Si:Ge, облученных нейтронами. // ФТП. 1990. Т.24. В.6. С.993-998.

4. Маринченко А.В., Хируненко Л.И., Шаховцов В.И., Яш-

ник В.И. Структура полос поглощения термодонорных центров в кремнии.// ФТП. 1990. Т.24. В.6. С.1126-1129.

5. Критская Г.В., Хируненко Л.И., Шаховцов В.И., Яшник В.И. Особенности спектров ИК поглощения термодоноров в кристаллах Si:Ge.// ФТП. 1990. Т.24. В.6. С.1129-1132.

6. Мизрухин Л.В., Хируненко Л.И., Шаховцов В.И., Шинкаренко В.К., Яшник В.И. Межпримесное взаимодействие в кремнии с нейтральными примесями.// В сб.: Свойства легированных полупроводниковых материалов. Под ред. Земскова В.С. М. Наука. 1990. С.186-190.

7. Помозов Ю.В., Хируненко Л.И., Яшник В.И. Трансформация дефектов при отжиге кремния, облученного большими флюенсами нейтронов.// Труды Международной конференции по радиационному материаловедению. Алушта. 1990. Т.4. С.167-172.

8. Кустов В.Е., Критская Г.В., Трипачко Н.А., Хируненко Л.И., Шаховцов В.И., Яшник В.И. Внутренние упругие деформации в кремнии.// Неорг. материалы. 1991. Т.27. №6. С.1116.

9. Помозов Ю.В., Хируненко Л.И., Яшник В.И., Шинкаренко В.К. Трансформация дефектов при отжиге Si и Si:Ge, облученных электронами и нейтронами.// Электронная техника. Сер. Материалы. 1991. В.8(262). С.38-39.

10. Григорьева Г.М., Хируненко Л.И., Шаховцов В.И., Яшник В.И. и др. Радиационное дефектообразование в кремнии, легированном элементами IV группы.// Науч.-техн. сб. "Радиационные процессы в микронэлектронике". ЦНТИ. Поиск. М. 1993.

11. Pomozov Yu.V., Khirunen L.I., Shakhovtsov V.I., Yashnik V.I. Influence intrinsic elastic stress on the processes annealing radiation defects in silicon.// In: Defects in Semicond. I. NCDS-1. Ed. by Nikolay T. Bagraev. 1993.

Yashnik V.I. Defect formation in silicon doped with IV group elements.

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, 1994.

The influence of izovalent impurities upon processes of thermal and radiation defect formation in Si was investigated. A number of new types of thermal donor centres was discovered in Si doped with Ge. The thermal stability raise of Si doped with Ge was explained. It was shown doping with Ge result in the fall of the formation efficiency of secondary radiation defects in Si independently on the irradiation temperature. The effect is explained in the supposition Ge atoms as indirect annihilation centres.

Яшник В.И. Дефектообразование в кремнии, легированном элементами IV группы.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела, Институт физики НАН Украины, Киев, 1994.

В работе исследовалось влияние изовалентных примесей на процессы термического и радиационного дефектообразования в Si. Обнаружено, что при легировании Si германием образуется ряд новых типов термодонорных центров. Объяснено повышение термостабильности Si при легировании Ge. Обнаружено, что легирование Ge приводит к понижению эффективности введения вторичных радиационных дефектов в Si независимо от температуры облучения. Эффект объясняется в предположении, что атомы Ge являются центрами аннигиляции первичных радиационных дефектов.

Ключові слова: кремній, германій, термодонори,

радіаційні дефекти, центри анігиляції.

ІНБ ім. В. Стефанива

АН України

ЯШНИК ВІКТОР ІВАНОВИЧ

ДЕФЕКТОУТВОРЕННЯ В КРЕМНІІ, ЛЕГОВАНОМУ  
ЕЛЕМЕНТАМИ ІУ ГРУПИ

Підписано до друку 25.11.94. Формат паперу 80x84/16.  
Папір офсетний 80гр./м<sup>2</sup>. Друк офсетний. Ум.-друк.  
аркушів 1,0. Ум.-вид. аркушів 0,85. Тираж 100. Зам.№84.  
Безкоштовно.

Інститут фізики НАН України, ВНІІ  
252650, Київ-22, МСП, пр.Науки 46

В. Стефанюк  
АН України







AB 31.496

**AB 31.496**

**БЕЗКОШТОВНО**