

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ НАНУ
СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВЧЕНА РАДА К50.07.02.

На правах рукопису

УДК 621.315.592

Кириця Володимир Леонідович

Роль процесів дифузії та міждефектної взаємодії у
формуванні властивостей кристалів кремнію.

(01.04.07– фізика твердого тіла)

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
фізико-математичних наук

Київ – 1997.



Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті фізики напівпровідників НАН України,
м. Київ.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Бабич Вілік Максимович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Романюк Борис Миколайович
кандидат фізико-математичних наук, доцент
Москаль Денис Миколайович

Провідна організація: Інститут ядерних досліджень НАН України.

Захист відбудеться 19 бересня 1997 р. о 14¹⁵ на
засіданні Спеціалізованої вченої ради К50.07.02. в Інституті фізики
напівпровідників НАН України за адресою: 252650 Київ-28, проспект
Науки, 45.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту
фізики напівпровідників НАН України, м. Київ.

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

Автореферат розіслано 7.08 1997 р.

Вчений секретар Спеціалізованої ради
кандидат фізико-математичних наук

Рудько Г.Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність теми.

Як відомо, основним матеріалом сучасної напівпровідникової електроніки являється кремній (на його основі виробляється більше 90% напівпровідникових приладів). Таке широке використання напівпровідникового кремнію обумовлено, в першу чергу, його унікальними властивостями і відносно низькою собівартістю.

В промисловому вирощуванні монокристалічного кремнію перевага надається методу Чохральського. Біля 80% монокристалічного Si одержують цим методом. В процесі витягування монокристалу із розплаву відбувається його неминуче «забруднення» різними домішками, особливо киснем і вуглецем. Концентрація $[O_i]$ звичайно досягає значень в межах $5 \times 10^{17} - 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а концентрація вуглецю $[C_s] = 1 \times 10^{16} - 8 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, що в багатьох випадках перевищує концентрацію основної легуючої домішки. Характерною особливістю поведінки кисню в кремнії являється його здатність змінювати свій стан під впливом зовнішніх факторів. Відомо, що ізольовані атоми кисню знаходячись в Si в міжвузельному стані являються електрично неактивними. Але різні термообробки, радіаційне опромінення та інші технологічні операції, які використовують в процесі виготовлення напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем, приводять до того, що атоми кисню починають взаємодіяти, як між собою, так і з іншими домішками та дефектами кристалу. В результаті такої взаємодії утворюються кисневі комплекси, які проявляють електричну активність досить складного характеру.

Проблема підвищення проценту виходу якісної продукції при вирощуванні кристалів кремнію та виготовлення на їх основі напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем пов'язана з проблемою домішок та дефектоутворення в кисневмісних кристалах Si. Вдосконалення технологічних процесів виробництва та покращення властивостей готових приладів вимагають детального розуміння поведінки дефектів (особливо кисневої природи) та їх впливу на властивості матеріалу Si.

Останнім часом в цьому напрямку ведуться інтенсивні дослідження. Але, незважаючи на тривалість і широкий діапазон наукових досліджень, багато аспектів проблеми залишаються не зрозумілими. Зокрема потребують додаткового вивчення процеси дифузії домішок та міждомішкової взаємодії і їх вплив на властивості кристалів Si.

Мета і задачі роботи.

Мета роботи впливає із викладеного вище і полягає у вивченні ролі процесів дифузії, та міждефектної взаємодії в утворенні електрично активних кисневих комплексів в Si і їх впливу на електрофізичні властивості кристалів кремнію.

Наукова новизна.

Встановлено спільні ознаки та різницю в поведінці ізовалентних домішок (ІВД) германію (Ge) та вуглецю (C) при формуванні термодфектів кисневої природи (ТД-I, ТД-II та преципітатів) в кристалах кремнію, вирощених методом Чохральського.

1. Показано, що ІВД Ge в межах її вмісту від 10^{18} до 2×10^{20} см⁻³ не приймає участі в міждомішкочій взаємодії, тобто не приймає участі в утворенні комплексів як з легуючими, так і з фоновими домішками (кисень, вуглець), а також не впливає на енергетичні

- рівні ТД-I в забороненій зоні Si. На відміну від ІВД Ge, домішка C приймає участь у створенні міждомішкових утворень, зокрема CO_n -комплексів.
2. Пояснено видиму схожість впливу ІВД Ge та C на процеси утворення ТД-I при відпалах в інтервалі температур 400-500°C. Показано, що в основі схожого впливу цих домішок на утворення ТД-I лежать різні фізичні процеси.
 3. Наявність ІВД Ge в кисневмісних кристалах Si веде до появи підвищеної складової дифузії міжвузлового кисню O_i . А при концентраціях $\text{Ge} \geq 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ дифузія атомів O_i відбувається тільки з підвищеним коефіцієнтом дифузії.
 4. Показано, що ІВД Ge та C по різному впливають на процеси преципітації кисню та утворення ТД-II при відпалах в інтервалі температур 550-800°C; запропоновані модельні пояснення такого різного впливу цих домішок.
 5. Детально вивчено вплив супутньої домішки вуглецю на формування і властивості електрично активних кисневих комплексів, які утворюються при одно- і двоступінчатих відпалах при температурах 400-800°C. Досліджено кінетику утворення та спектр ТД, які утворюються в кристалах з малим та великим вмістом вуглецю. Встановлено, що домішка C пригнічує утворення ТД-I, але сприяє преципітації кисню та утворенню ТД-II, а також впливає на процеси утворення і на властивості мілких ТД (рівні енергій, g-фактори, термостійкість). Не виключена можливість, що C входить в склад таких МТД.
 6. За допомогою нового підходу з використанням комплексу методик підтверджено припущення, що в склад глибоких ТД (ГТД), які утворюються тільки в p-Si(B), входять атоми домішки бору.

7. Встановлено, що при низьких температурах ($T \leq 40\text{K}$) вирішальний вплив на розсіювання носіїв струму у відпалених кристалах в діапазоні температур $450\text{-}1100^\circ\text{C}$, мають преципітати кисню. Розсіювання на преципітатах у відпалених кисневмісних кристалах нівелюється при легуванні Si ІВД Ge та C в значних концентраціях, а також високотемпературними відпалами при $1200\text{-}1300^\circ\text{C}$.

Наукова і практична значимість роботи полягає в тому, що вивчено вплив термообробок кисневмісних кристалів Si з різним вмістом домішок (Ge, C, B, P) в інтервалі температур, характерних для виробництва напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем, на електрофізичні властивості монокристалів Si, вирощених по методу Чохральського.

Одержані нами результати в значній мірі поглиблюють розуміння фізичних процесів, які ідуть при термообробках кисневмісних кристалів кремнію, що дозволяє краще прогнозувати і керувати властивостями напівпровідникового матеріалу як на етапі вирощування зливків, так і в процесі виготовлення приладів. Крім цього, виявлені властивості кисневих комплексів і поведінки кисню в кристалах кремнію дають можливість створювати нові технологічні операції з метою поліпшення виходу готової продукції при виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем.

Положення роботи, що виносяться на захист.

1. Вплив ізовалентних домішок C та Ge в кисневмісних кристалах Si на процеси утворення ТД-I, ТД-II та преципітацію кисню в основному ґрунтується на тому, що атоми цих домішок мають ковалентні радіуси, які значно відрізняються від ковалентного радіуса атомів матриці

кристалу Si ($R_{Si} = 1,17 \text{ \AA}^\circ$; $R_{Ge} = 1,22 \text{ \AA}^\circ$; $R_C = 0,77 \text{ \AA}^\circ$). Це приводить до утворення локальних напружень стиску або розтягу в оточенні атомів ІВД Ge та C відповідно і до опосередкованого впливу цих локальних напружень в ґратці на процеси дефектоутворення при відпалах кисневмісних кристалів Si в діапазоні температур 400-800°C.

2. Процеси утворення ТД під час одно та двоступінчатих відпалів кристалів Si в інтервалі температур 400-800°C сильно відрізняються у кристалах з великим ($[C_s] \geq 8 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$) та малим ($[C_s] \leq 3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$) вмістом ІВД вуглецю. В кристалах Si з малим вмістом C ТД утворюються в усьому температурному діапазоні, в кристалах з високим вмістом C діапазон утворення ТД звужується (450-750°C). При низькотемпературних відпалах (450-550°C) домішка C сприяє міждомішкковій взаємодії (утворенню комплексів CO_n), що приводить до утворення так званих мілких ТД (МТД).
3. Одержано експериментальне підтвердження того, що до складу глибоких ТД (ГТД) з енергією іонізації $E_{ГТД} \approx 200 \text{ меВ}$, які утворюються при відпалах кисневмісних кристалів p-Si(B), входять атоми бору. Атоми бору при $T_{відп} = 450^\circ\text{C}$ втрачають свої акцепторні властивості і беруть безпосередню участь в утворенні донорних кластерів.
4. При низьких температурах вимірювань ($T \leq 40 \text{ K}$) рухливість носіїв струму ($\mu_x \sim T^n$; $n \geq 2$) в кристалах кремнію, вирощених методом Чохральського і відпалених

при 450-1100°C, визначається розсіюванням на кисневих преципітатах, які утворюються при таких термообробках.

Апробація роботи.

Основні результати роботи доповідались на:

II-й Українській конференції «Матеріалознавство і фізика напівпровідникових фаз змінного складу» (м. Ніжин, вересень 1993 р.);

Українській школі з фізики напівпровідників «Актуальні питання фізики напівпровідників» (м. Дрогобич, червень 1996 р.);

I-й Всеросійській конференції з матеріалознавства та фізико-хімічних основ технології одержання легованих кристалів кремнію («Кремній – 96») (м. Москва, листопад 1996 р.);

Міжнародній конференції по оптичній діагностиці матеріалів та приладів для опто-, мікро- та квантової електроніки (OPTDIM-97) (м.Київ, травень 1997 р.);

семінарах ІЯД НАНУ та ІМ НАНУ, а також на Лашкарьовських читаннях ІФН НАНУ.

Публікації.

Основні результати дисертації опубліковані у 7 роботах, перелік яких наведений в кінці автореферату.

Особистий науковий внесок.

Дисертація є узагальненням досліджень, виконаних автором особисто і в співавторстві з колегами по роботі. Автор особисто провів більшість експериментів, результати яких лягли в основу роботи і визначили її наукову новизну. Дисертанту належить суттєва роль в інтерпритації отриманих результатів і написанні наукових праць.

Об'єм і структура дисертації.

Дисертація складається із вступу, п'яти глав, висновків та списку цитованої літератури з 152 найменувань, в тому числі 7

посилань на авторські роботи. Робота викладена на 144 сторінках друкованого тексту і містить 29 рисунків і 1 таблицю.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі обґрунтовується актуальність теми дослідження, сформульовані мета і завдання роботи, новизна та практична значимість отриманих результатів, основні наукові положення, які вносяться на захист, наведено відомості про апробацію матеріалів досліджень.

В першій главі зроблено короткий огляд робіт присвячених проблемі кисню в кремнії.

Розглянуто основні властивості міжвузлового кисню в кристалах кремнію (положення в ґратці, коефіцієнт дифузії, оптична активність, розчинність).

Далі в главі 1 наводяться основні відомі властивості кисневих термодонорів-I (утворюються при 350-550°C) та термодонорів-II і термоакцепторів (утворюються при 550-800°C). Розглянуто накопичений експериментальний матеріал по впливу легуючих та фонових домішок на процеси утворення ТД і ТА. Зроблено аналіз деяких моделей утворення ТД-I і ТД-II та їх можливої структури.

В другій главі описано експериментальні методики і установки, які використовувались в роботі. Наведено похибки вимірювань.

В дослідженнях використовувались наступні методики:

1. Вимірювання ефекту Холла, питомої електропровідності в області температур 15-500 К і побудова температурних залежностей концентрації носіїв струму від температури.
2. Метод ЕПР для дослідження парамагнітних центрів у вихідних та відпалених кристалах Si.

3. Метод дихроїзму основної ІЧ полоси поглинання міжвузлового кисню.
4. Метод рентгенівської топографії.
5. Метод низькотемпературної фотолюмінесценції.

Найбільш докладно описано метод визначення коефіцієнту дифузії міжвузельного кисню в кремнії по дихроїзму його основної (9мкм) ІЧ-полоси поглинання.

Глава 3 присвячена вивченню впливу ізовалентних домішок вуглецю і германію на процеси утворення та властивості електрично активних кисневих комплексів в кристалічному кремнії.

Показано, що вміст в кристалі кремнію ізовалентних домішок вуглецю і германію (в широких діапазонах концентрацій) не впливає на електрофізичні властивості вихідних кристалів Si. Разом з цим наші експерименти виявили вплив цих домішок на процеси утворення кисневих електрично активних комплексів ТД-I і ТД-II. Домішка Ge пригнічує утворення як ТД-I так і ТД-II. Домішка C також пригнічує процеси утворення ТД-I, але сприяє утворенню ТД-II. Нам вдалося пояснити такий вплив ізовалентних домішок Ge та C на формування ТД в рамках вибраних моделей утворення ТД-I і ТД-II, враховуючи, що атоми Ge і C створюють в ґратці Si локальні напруження стиску і розтягу відповідно і через ці напруження опосередковано впливають на процеси утворення електрично активних кисневих комплексів.

Дослідження дифузії кисню в кристалах Si, легованих Ge показали, що присутність домішки Ge приводить до виникнення підвищеної складової в дифузії кисню. Цей факт разом із фактом пригнічення германієм утворення ТД-I дозволяє зробити висновок про незначну роль дифузії кисню в процесах формування ТД-I і

говорить на користь тих моделей ТД-I, в яких основна роль у формуванні центрів ТД-I відводиться дифузії міжвузельних атомів Si. Обговорюється можливий вплив ІВД Ge на утворення кисневих зародків ТД-I в процесі росту кристалів Si.

Із результатів експериментів також зроблено висновок про те, що атоми Ge не беруть участі у міждомішкочивій взаємодії, тоді як атоми С приймають участь у формуванні мілких ТД, утворюючи CO_n -комплекси.

Глава 4 присвячена вивченню електрично активних комплексів, які утворюються в кристалах p-Si, легованих бором при відпалах при 450°C і тривалістю до 240 год, з метою підтвердження припущення про участь домішки бору у формуванні глибоких ТД з $E_t \approx 200\text{meV}$. Для досліджень ми взяли вільні від дислокацій кристали кремнію, вирощеного по методу Чохральського з вмістом легуючих (бор і фосфор) та фонових (кисень і вуглець) домішок:

$$\text{Кристал № 1: } N_B = 10^{15} \text{ cm}^{-3}, N_P = 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3},$$

$$N_O = 7,2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}, N_C = 7,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3},$$

$$\text{Кристал № 2: } N_B = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}, N_P = (2-3) \times 10^{14} \text{ cm}^{-3},$$

$$N_O = 9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}, N_C = 10^{16} \text{ cm}^{-3}.$$

Із холлівських та ЕПР-вимірювань були побудовані кінетики утворення ТД та парамагнітних центрів. Їх аналіз дав нам можливість зробити припущення про те, що можливо атоми бору приймають участь у формуванні глибоких ТД ($E_t = 200\text{meV}$). Застосування додаткової методики з використанням фотолумінесцентних вимірювань дало можливість побудувати кінетику випадання атомів бору із акцепторного стану в інший, електрично неактивний. Кінетика цього процесу точно співпадала з кінетикою утворення ГТД, на основі чого зроблено висновок про

беспосередню участь атомів бору у формуванні глибоких ТД. З врахуванням цих експериментів пояснено поведінку спектрів ЕПР в цих кристалах, зокрема, вигляд кінетики утворення центрів NL8. Наведено можливу структурну модель ГТД-центрів, ними можуть бути кисневі комплекси, які сформувалися навколо атомів бору.

В главі 5 досліджено вплив преципітатів кисню, які утворюються в діапазоні температур 400-1200° С на розсіювання носіїв струму при низьких температурах ($T \leq 40\text{K}$).

З експериментальних даних побудовані залежності холлівської рухливості електронів μ_x від температури для кристалів, що пройшли відпали різних тривалостей при 450, 700, 800, 1200°С.

Виявилось, що одержані залежності Холлівської рухливості $\mu_x(T)$ неможливо коректно описати за допомогою теоретичних уявлень про анізотропне розсіювання електронів на іонізованих домішках, міждолинних та акустичних фононах у відпалених кристалах n-Si. Експериментальні залежності $\mu_x(T)$ при $T \leq 40\text{K}$ змінюють свій вигляд в залежності від температури і тривалості відпалів. Ці параметри, як відомо впливають на концентрацію, розміри та форму преципітатів, які утворюються. Також встановлено, що легування кристалів Si домішками Ge і С (певної концентрації) зменшує розбіжність експериментальної кривої з теоретичною.

Відомо, що відпали кристалів Si при температурі $\cong 1200^\circ\text{C}$ сприяють розчиненню кисневих преципітатів (це спостерігали на рентгенівських топограмах), але повного нівелювання додаткового розсіювання при $T \leq 40\text{K}$, як показали експерименти, такі відпали не давали. Лише відпали при 1300°С тривалістю 10-20 год знімають додаткове розсіювання електронів при низьких температурах. Це

пояснюється тим, що при 1200°C деяка кількість мілких преципітатів залишається, що спостерігається на топограмах. Відпали ж при 1300°C приводять до повного розчинення усіх преципітатів кисню.

З експериментальних та теоретичних даних, представлених у цій главі, зроблено деякі висновки, а саме:

1. В слабологованих кристалах ($N_{P,B} \approx 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$) розсіювання носіїв струму на преципітатах, які утворюються в широкому інтервалі температур відпалу (450 – 1100°C), часто визначає вигляд залежності $\mu_x(T)$ при низьких температурах ($T \leq 40 \text{ K}$), набагато перевищуючи в цій області температур внесок в цю залежність розсіювання носіїв струму на іонізованих домішках.

2. Позитивну роль у нівелюванні розсіювання носіїв струму на преципітатах кисню відіграє легування кристалів Si ізовалентними домішками Ge та C в значних концентраціях, яке приводить до впливу на процеси преципітації кисню в таких кристалах.

3. Високотемпературні відпали при 1300°C, які приводять до повного розчинення преципітатів, знімають їх вплив на вигляд залежності $\mu_x(T)$ при низьких температурах.

ВИСНОВКИ.

1. Проведено вивчення процесів дефектоутворення в кисневмісних кристалах n- та p- типу кремнію, легованих окрім основних домішок (фосфору та бору) ізовалентними домішками германію та вуглецю в концентраціях: $[Ge] = 5 \times 10^{18} - 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$; $[C] = 10^{16} - 8 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Було встановлено, що:

а) існує лише видима схожість впливу ІВД германію та вуглецю на процеси утворення ТД-І при відпалі кристалів Si в діапазоні температур 350-550°C, яка проявляється в тому, що обидві ці

домішки, що характеризуються ковалентними радіусами, відмінними від ковалентного радіуса атома Si матриці, приводять до гальмування процесів утворення ТД-I. Однак, до такого результату, як показав аналіз експериментальних даних, приводять різні фізичні процеси, які супроводжують відпали зразків при температурах 350-550°C.

б) вплив домішки вуглецю в кремнії на утворення ТД-I проявляється з двох причин:

- по-перше, внаслідок міждомішкової взаємодії, яка приводить до взаємодії вуглецю з міжвузловим киснем, і утворення CO_n -комплексів (можливо, деякі з них являються електрично активними). Це приводить до зменшення концентрації кисню, яка приймає участь в утворенні зародків ТД-I;

- по-друге, атоми вуглецю з їх малими розмірами в порівнянні з атомами Si, створюють локальні напруги розтягу і цим сприяють анігіляції первинних рухомих дефектів, в першу чергу таких як міжвузлові атоми Si, виводячи їх із процесів формування ТД-I, яким, згідно до ряду моделей ТД-I, належить основна роль у генерації ТД-I.

в) гальмування процесів утворення ТД-I не визначається зміною коефіцієнта дифузії кисню в сторону його зменшення при наявності атомів Ge в кристалі Si. Навпаки, як показують дослідження дихроїзму ПЧ-поглинання полоси 1106 cm^{-1} , в близькому оточенні атомів ІВД Ge, з'являється складова підвищеного коефіцієнта дифузії міжвузлового кисню, яка визначається локальними напруженнями стиску, які створює домішка Ge в ґратці Si.

г) міждомішкова взаємодія ІВД Ge з іншими домішками відсутня (не спостерігалось утворення комплексів домішок, до складу яких в

результаті віпалів входила б домішка Ge та інші легуючі або фонові домішки аж до концентрацій $[Ge] \approx 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$).

д) на відміну від вуглецю, домішка Ge, яка створює в кристалі Si локальні напруги стиску, тобто такого ж знаку, як і преципітати кисню, гальмує утворення ТД-I тому, що вона виступає в ролі центрів анігіляції власних міжвузлових атомів Si_i та протидіє утворенню мікропреципітатів кисню – зародків ТД-I в процесі вирощування зливка.

2. Встановлено, що ІВД Ge та C по-різному впливають на процеси преципітації кисню та утворення термодонорів-II при відпалах в інтервалі температур 550-800°C. Показано, що:

а) домішка C виступає в ролі центрів гетерогенного зародження преципітатів і відповідно, ТД-II. На відміну від вуглецю, домішка Ge створює в кристалі Si локальні напруження стиску, заважаючи цим самим розпаду пересиченого твердого розчину кисню, приводячи до гальмування преципітації кисню і утворення центрів ТД-II.

б) утворення ТД-II відбувається по різному також в кристалах з малим ($\leq 3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$) та великим ($\geq (4-8) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$) вмістом домішки C. Зокрема, в кристалі Si з великим вмістом C звужується діапазон температур, при яких відбувається утворення ТД-II (наприклад, при $T_{\text{відп}} = 750^\circ\text{C}$ іде різкий спад кінетики утворення ТД-II, а при 800°C взагалі не утворюються ці центри).

в) крім того, основна частина ТД-II в кристалі Si з великим вмістом ($\geq 10^{17} \text{ см}^{-3}$) вуглецю має енергії термічної іонізації $E_{\text{ТД-II}} \leq E_F$ (E_F - енергія термічної іонізації домішки фосфору), в той час як в кристалах Si з малим вмістом ІВД вуглецю може спостерігатись широкий набір рівнів ТД-II в забороненій зоні Si в діапазоні 20-200 мев.

3. Дослідження процесів утворення ТД-I при довготривалих відпалах (до 700 год), а також утворення ТД-II при двоступінчатих відпалах в кристалах Si з великим та малим вмістом вуглецю показали, що поділ температурного діапазону 350-800°C на два (350-550°C і 550-800°C, в яких утворюються відповідно ТД-I і ТД-II) – є чисто умовним. Утворення ТД-центрів з характеристиками ТД-II відбувається уже при довготривалих низькотемпературних відпалах при 450-500°C. При цьому у збагачених вуглецем кристалах при таких відпалах утворюється значна концентрація ТД-центрів термостійких до більш високотемпературних відпалів.

4. Досліджено процеси переносу носіїв заряду в кисневмісних кристалах Si, відпалених в інтервалі температур 450-1200°C. Аналіз експериментальних температурних залежностей рухливості носіїв струму у відпалених зразках Si вказує на появу в них додаткового механізму розсіювання вільних носіїв струму, а саме, розсіювання на преципітатах кисню, яке проявляється при низьких температурах вимірювань (≤ 40 K). При цьому встановлено, що:

а) розсіювання носіїв струму у слабологованих ($N_{B,P} \approx 10^{14}-10^{15} \text{ см}^{-3}$) відпалених кристалах Si n- та p-типів при вимірюваннях в області низьких температур ($T \leq 40$ K) визначається в основному розсіюванням на преципітатах, набагато перевищуючи при цьому внесок в залежність $\mu_x=f(T)$ розсіювання носіїв струму на іонізованих домішках в цій області температур ($\mu_x \sim T^n$; $n \geq 2$).

б) позитивну роль в нівелюванні розсіювання носіїв струму на преципітатах кисню відіграє легування кристалів Si ізовалентною домішкою Ge (до концентрацій $\geq 10^{19} \text{ см}^{-3}$) та C (до концентрацій $\geq 4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$), яке приводить до сповільнення процесів преципітації

кисню в таких кристалах, а також високотемпературні відпали при 1300°C , які сприяють повному розчиненню преципітатів.

5. Досліджено утворення ТД-I при $T_{\text{відп}}=450^{\circ}\text{C}$ і тривалістю відпалу до 240 год в кисневмісних кристалах p-Si, легованих бором. Використання методу низькотемпературної люмінесценції в комплексі з ефектом Холла та ЕПР дозволило встановити, що:

а) в таких кристалах поряд з процесами формування двозарядних ТД-I, виявлено утворення однозарядних глибоких ТД (ГТД) з енергією термічної іонізації $E_{\text{ГТД}} \approx 200$ меВ.

б) показано, що в утворенні однозарядних ГТД приймає безпосередню участь домішка бору. Спостерігалась кількісна кореляція між кінетикою переходу домішки бору з вузлового (акцепторного) стану в інший (електрично неактивний) стан та кінетикою утворення ГТД, що дало нам можливість зробити висновок про участь домішки бору в формуванні ГТД-центрів та запропонувати модель ГТД.

Основні результати дисертації опубліковані в статтях:

- 1) Бабич В.М., Баран М.П., Бугай А.А., Кирица В.Л., Скороход М.Я. Розсіювання носіїв струму у відпалених кристалах кремнію, вирощених по методу Чохральського. // УФЖ.–1994.–Т.39.–№4.–С.481-485.
- 2) Бабич В.М., Баран Н.П., Зотов К.И., Кирица В.Л., Ковальчук В.Б. Низькотемпературная диффузия кислорода и образование термодоноров в кремнии, легированном изовалентной примесью германия. // ФТП.–1995.–Т.29.–Вып.1.–С.58-64.
- 3) Бабич В.М., Баран Н.П., Кирица В.Л. Влияние изовалентных примесей углерода и германия на свойства кислородсодержащих

- кристаллов кремния.// Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.–1995.–Вып.29.–С.94-100.
- 4) Бабич В.М., Баран Н.П., Бугай А.А., Кирица В.Л., Максименко В.М. Образование термодоноров при одно и двухступенчатых отжигах в кристаллах кремния с большой и малой концентрацией углерода. // ФТП.– 1996.– Т.–30.– вып.5.– С.777-782.
- 5) Babich V.M., Baran N.P., Valakh M.Ya., Kiritsa V.L., Rudko G.Yu. On the nature of deep donors created at 450 °C in boron doped p-Si.// Phys. Stat. Sol.(a).–1996.–v.157,n.2.–p.405-410.
- 6) Бабич В.М., Баран Н.П. Валах М.Я., Кирица В.Л., Рудько Г.Ю. Влияние легирующей примеси бора на процессы образования термодоноров при 450 °С в кислородосодержащих кристаллах кремния.// ОПТ.–1996.–Вып.31.–С.69-73.
- 7) Бабич В.М., Баранський П.І., Кирица В.Л. Магнітоп'єзоопір компенсованих кристалів р-Ge.// УФЖ.– 1997.– Т.42, N3.– С.360-363.

Аннотация.

Кирица В.Л. *«Роль процессов диффузии и междефектного взаимодействия в формировании свойств кристаллов кремния».*

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07. – физика твёрдого тела. Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев, 1997.

Выполнены экспериментальные исследования формирования электрофизических свойств кислородсодержащих кристаллов кремния, обусловленных электрически активными кислородными комплексами и преципитатами, которые образуются в них при термообработках.

Изучено влияние изовалентных примесей (ИВП) германия и углерода на процессы образования кислородных термодоноров (ТД) в кремнии. Сравнение поведения этих примесей в кристалле кремния позволило объяснить влияние ИВД Ge и C на процессы образования ТД в рамках одной из существующих моделей термодоноров.

Показано, что в термообработанных кислородсодержащих кристаллах кремния вид зависимости $\mu_x = f(T)$ при низких температурах ($T \leq 40\text{K}$) определяется рассеиванием носителей тока на преципитатах кислорода, которые образуются при отжигах в диапазоне температур 450-1100°C.

Получено экспериментальное подтверждение тому, что в состав глубоких ТД (ГТД) с энергией ионизации $E_{ГТД} \approx 200$ меВ, которые образуются при отжигах кислородсодержащих кристаллов p-Si(B), входят атомы бора. Атомы бора при $T_{отж} = 450^\circ\text{C}$ теряют свои акцепторные свойства и принимают непосредственное участие в образовании донорных кластеров.

Abstract.

Kyrytsya V.L. "The Role of the Diffusion and Interdefect Interaction in the Formation of the Silicon Crystals Properties". The physics and mathematics candidate (Ph.D.) thesis on speciality 01.04.07.- Solid State Physics. Institute of Semiconductor Physics, Ukrainian National Academy of Science, Kiyiv, 1997.

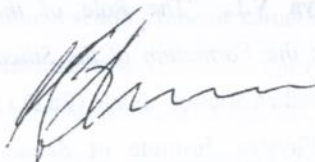
In the work have been carried out experimental research of the formation of the properties of the oxygen containing silicon crystals, caused by the electrically active oxygen complexes and precipitates being formed in them during the thermal treatments.

The influence of the germanium and carbon isovalency impurities on the process of the oxygen thermal donors (TD) formation in the silicon have been studied. The comparison of the behavior of these impurities in the silicon crystals have made it possible to explain the influence of the Ge and C on the process of the TD formation within the one of the existing TD models.

It is shown that in the annealed oxygen containing silicon crystals the dependence $\mu_x=f(T)$ under low temperatures ($T \leq 40K$) is determined by the scattering of the charge carriers on the precipitates being formed during the anneals over the temperature range 450-1100°C.

It was experimentally proved that the atoms of boron impurities take part in the formation of the deep oxygen TD. This TD with the energy of ionization $E_i \approx 200$ meV are formed during the anneals under 450°C in the oxygen containing crystals p-Si(B). The atoms of the boron loose their acceptor properties and directly take part in the formation of the donor clusters.

Ключові слова: кремній Чохральського, термообробка, кисневі комплекси, термодонори, преципітати.



Підписано до друку 25.06.97р. Формат 60x84/16.
Ум. друк. арк. 1,0. Обл.-вид. арк. 1,0.
Наклад 100. Зам. 221.

Відділ оперативної поліграфії
Центру Міжнародної освіти
227-12-75, 227-37-86

433575

AV 38.391