ДОПОВІДІ
НАЦІОНАЛЬНОЇ
АКАДЕМІЇ НАУК
УКРАЇНИ

7 • 2016

ФІЗИКА

http://dx.doi.org/10.15407/dopovidi2016.07.062

УДК 621.315.592

Г. П. Гайдар[1], П. І. Баранський[2]

[1]Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ
[2]Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ
E-mail: gaydar@kinr.kiev.ua

Вплив ізовалентної домішки Ge і термовідпалів на електрофізичні властивості кристалів кремнію

(Представлено членом-кореспондентом НАН України О. Є. Бєляєвим)

У зразках Cz–Si *n-типу, легованих ізовалентною домішкою германію, виявлено суттєве зниження ефективності утворення термодонорів у процесі термовідпалів, а також встановлено підвищення радіаційної стійкості приблизно на порядок при опроміненні* nSi ⟨Ge⟩ *швидкими нейтронами реактора.*

Ключові слова: кремній, ізовалентна домішка, германій, термовідпал, опромінення, швидкі нейтрони, радіаційна стійкість.

Ізовалентні домішки (наприклад, C, Ge, Sn для Si чи C, Si, Sn для Ge) електрично-неактивні в тому сенсі, що в забороненій зоні відповідних кристалів не утворюють електрично-активних центрів донорного чи акцепторного типів. Однак в околиці домішкових атомів виникають локальні механічні напруження стиску чи розтягу кристалічної гратки, залежно від співвідношення тетраедричних радіусів атомів матриці і домішки [1]. Такі напруження, в свою чергу, зумовлюють зміну рівноважної концентрації власних точкових дефектів — міжвузлових атомів I_{Si} і вакансій V, а отже, і процесів утворення та взаємодії (між собою і з домішковими атомами) різних дефектів [2]. Тобто, наявність зазначених механічних напружень істотно впливає на механізми термічного і радіаційного дефектоутворення в кристалах Si і Ge з ізовалентними домішками.

Наявність домішки кисню в кристалах Si у концентрації $(5 \div 20) \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ (у таких межах присутній кисень у кристалах Si, вирощених методом Чохральського) суттєво впливає на ряд важливих електрофізичних і структурних параметрів цього (профілюючого в твердотільній електроніці) матеріалу. Термовідпали в широкому температурному інтервалі (450–1250 °C) кисневмісних кристалів Si призводять до інтенсивного розпаду пе-

© Г. П. Гайдар, П. І. Баранський, 2016

ресиченого твердого розчину кисню в кремнії і утворення широкого спектра мікродефектів (включаючи й електрично-активні — термодонори і термоакцептори).

У ряді робіт [3–5] вивчався вплив ізовалентної домішки Ge на кінетику утворення термодонорів, якісний склад та положення їх рівнів у забороненій зоні Si, а також на дифузію міжвузлового кисню. Кластеризація кисню та інших (фонових) домішок під час термообробок кристалів є основною причиною зміни електрофізичних властивостей кремнію і тих приладів, які створюються на його основі.

Відомо [1, 4, 6], що термовідпал кристалів Si в інтервалі температур 350– 550 °C зумовлює утворення термодонорів. Оскільки термообробка в багатьох випадках використовується в технологічному процесі виготовлення сучасних напівпровідникових приладів, великого значення набувають фактори, які дозволяють управляти процесом утворення термодонорів. Одним із них є легування кремнію ізовалентними домішками, зокрема домішкою Ge.

У роботі [7], з використанням рентгенівської топографії, декорування дефектів міддю, ефекту Холла та інших методик, досліджено процеси утворення структурних дефектів у кисневмісних кристалах Si, легованих ізовалентною домішкою Ge (від $5 \cdot 10^{18}$ до $2 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$) при різних термовідпалах у температурному інтервалі 450–1250 °C. При цьому було показано, що домішка Ge в кристалах Si сприяє утворенню дефектної структури, яка за звичайних умов слабо проявляється, але призводить до появи особливостей у формуванні мікродефектів, а також атмосфер Коттрелла біля ядер дислокацій.

У роботі [8] показано, що густина ростових дефектів структури монокристалів Si, легованих ізовалентною домішкою Ge, значно менша (інколи на 2–3 порядки), ніж у кристалах Si без домішки Ge. Характерно, що і радіаційна стійкість такого матеріалу також підвищена, що пов'язано, в першу чергу, зі зниженням ефективності введення в такі кристали вторинних радіаційних дефектів: дивакансій і A-центрів [9]. Здавалося б, що кристали Si із зазначеними вище перевагами перед кристалами, які не мають домішки Ge в своєму об'ємі, мали б знайти більш широке застосування у виробництві напівпровідникових приладів. Однак цього поки що не сталося. Однією з можливих причин могло бути те, що зливки Si з домішкою Ge за структурною досконалістю не конкурентноздатні з кристалами Si, вільними від домішки Ge.

На сьогодні дуже актуальною є проблема підвищення радіаційної стійкості напівпровідникових матеріалів, що використовуються для створення електронних приладів, які тривалий час повинні зберігати експлуатаційні параметри під впливом ядерного опромінення. Один із способів вирішення цієї проблеми полягає у введенні в напівпровідник ефективних рекомбінаційних центрів для первинних радіаційних дефектів — вакансій та міжвузлових атомів.

Особливий інтерес представляє вивчення радіаційної стійкості кремнію, легованого германієм, оскільки ці матеріали мають однаковий тип кристалічної гратки, а їх ковалентні радіуси відрізняються лише на 4,2%. Не дивлячись на такі, здавалося б, незначні відмінності, дослідження n-Si ⟨Ge⟩ після низькотемпературного ($T \leqslant 90$ K) електронного опромінення показало, що присутність германію помітно знижує ефективність утворення A-центрів (VO) і дивакансій (V_2) внаслідок захоплення вакансій атомами Ge і створення комплексів Ge−V [10]. Відпал цих комплексів, як було показано в [11], відбувається у діапазоні температур 200–280 K, а отже, комплекс Ge−V не є термічно-стабільним. Аналіз спектрів DLTS, одержаних після опромінення зразків n-Si ⟨Ge⟩ протонами при температурі 30 K, показав, що комплекс Ge−V створює у верхній половині забороненої зони акцепторний рівень з енергією E_c — 0,29 еВ [12].

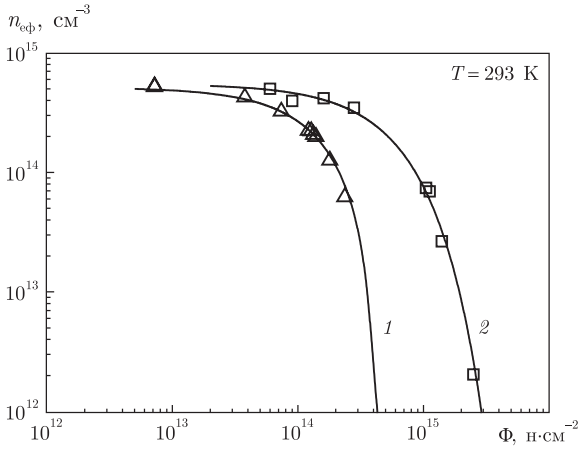

Рис. 1. Залежність ефективної концентрації носіїв ($n_{\text{еф}}$) від флюенса швидких нейтронів реактора (Ф) при кімнатній температурі у зразках Cz–Si: *1* — n-Si без Ge; *2* — n-Si ⟨Ge⟩; Δ — експериментальні дані; суцільні криві — результати розрахунку

Автори [13] встановили, що при електронному опроміненні монокристалів $Si_{1-x}Ge_x$ при температурі $T = 300$ K (коли комплекс Ge–V, фактично, уже відпалився) також спостерігається зниження ефективності утворення вакансійного типу радіаційних дефектів — VO та VO_2. Автори [9] не тільки зафіксували зниження швидкості введення A-центрів і дивакансій у зразках Si ⟨Ge⟩ приблизно у 2–3 рази в порівнянні з контрольними зразками кремнію після електронного опромінення при кімнатній температурі, але також спробували пояснити цей факт, припустивши, що атоми Ge є центрами непрямої анігіляції первинних радіаційних дефектів. При цьому враховувалося, що ймовірність захоплення вакансії атомами германію приблизно у 100 разів менша, ніж киснем згідно з оцінкою, проведеною в [9].

Накопичені в літературі дані стосуються, в основному, впливу електронного опромінення на радіаційне дефектоутворення в Si ⟨Ge⟩. Мета даної роботи полягала у вивченні впливу нейтронного опромінення на радіаційну стійкість n-Si ⟨Ge⟩. Окрім цього досліджувався вплив домішки германію на формування електрофізичних властивостей кисневмісних термовідпалених кристалів p-Si ⟨B⟩, а також вивчався ефект тензоопору в кристалах n-кремнію, легованих звичайною донорною домішкою фосфору (n-Si ⟨P⟩) та в кристалах з домішками фосфору і германію (n-Si⟨P + Ge⟩).

У роботі досліджувалися зразки n-Si ⟨Ge⟩ ($N_{\text{Ge}} \approx 2 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$) з питомим опором $\rho \approx 10$ Ом · см, вирощені методом Чохральського (Cz), а також стандартні зразки Cz–Si n-типу без домішки Ge після опромінення різними дозами швидких нейтронів. Концентрації носіїв до опромінення ($n_0 \approx (5{,}15 \div 5{,}5) \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$) та кисню ($N_{Oi} \approx (5 \div 6{,}4) \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$) у зразках були близькими, а вуглецю в Si ⟨Ge⟩ було в два рази більше ($N_C \approx 1 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$), ніж у Cz–Si. Концентрації германію, кисню та вуглецю в зразках вимірювалися методом фур'є-спектроскопії при кімнатній температурі.

Опромінення проводилося на горизонтальному каналі реактора ВВР–М при кімнатній температурі у діапазоні доз $7 \cdot 10^{12} \div 3 \cdot 10^{15}$ н/см^2. Виміри провідності та коефіцієнта Холла виконано компенсаційним методом Ван дер Пау на зразках розміром $10 \times 10 \times 1$ мм з точністю 3%. Контакти створювалися втиранням алюмінію на шліфовану поверхню кремнію.

Залежності $n_{\text{еф}}$ від флюенса швидких нейтронів реактора для зразків Cz–Si n-типу з домішкою Ge (крива *2*) та без неї (крива *1*) представлено на рис. 1. Виміри проводилися

при кімнатній температурі. Розрахунок $n_{\text{еф}}$ виконано в рамках моделі Госсіка з урахуванням перезарядки дефектів в області просторового заряду кластерів дефектів. Вважають, що радіаційна стійкість кремнію визначається флюенсом, при якому відбувається $n \to p$ конверсія. Як видно з рис. 1, легування германієм підвищує радіаційну стійкість матеріалу приблизно на порядок (крива *2*).

Проведений розрахунок середнього радіуса кластерів дефектів R_1 (методами, викладеними у [14]) показав зменшення його розмірів від 70 Å у Cz–Si до 40 Å у Si ⟨Ge⟩. Таке зменшення можна пояснити наступним чином. Відомо, що при опроміненні швидкими нейтронами відбувається сильний локальний розігрів зразка у місцях утворення каскадів зміщених атомів, що призводить до відпалу радіаційних дефектів. Унаслідок відмінності ковалентних радіусів Si і Ge відбувається ангармонізм коливань атомів у зразках Si ⟨Ge⟩, що знижує теплопровідність та збільшує час збереження локальної температури. Це, в свою чергу, призводить до більш ефективного відпалу дефектів у кластерах та зменшення R_1.

Зазвичай при кімнатній температурі глибокі акцепторні рівні радіаційних дефектів відповідальні за видалення електронів із зони провідності n-Si. Дивакансії (V_2) і тривакансійні дефекти (V_3) вводяться в n-Si з високою швидкістю і характеризуються глибокими рівнями у забороненій зоні: V_2^- (E_c — 0,42 еВ), V_3^- (E_c — 0,49 еВ), а рівень E_c — 0,45 еВ у Cz–Si описує сумісну дію акцепторних рівнів V_2 та V_3 у провідній матриці [14]. Щоб теоретично описати отримані експериментальні дані (див. рис. 1), необхідно використати різні швидкості введення (υ) усередненого рівня E_c — 0,45 еВ: у Cz–Si — $\upsilon = 1{,}3$ см$^{-1}$, а в Si ⟨Ge⟩ — $\upsilon = 0{,}1$ см$^{-1}$. Таким чином, присутність атомів германію в Cz–Si зменшує швидкість уведення глибоких дефектів вакансійного типу в провідну матрицю приблизно у 13 разів. Ми припускаємо, що атоми Ge виступають в якості рекомбінаційних центрів пар Френкеля. Із [15] відомо, що пари Френкеля при кімнатній температурі можуть існувати протягом кількох годин, а комплекс Ge–V швидко відпалюється [9] і не може бути центром непрямої анігіляції. Окрім цього ймовірність захоплення вакансії германієм мала і не пояснює зменшення швидкості введення вакансійних дефектів. Таким чином, здатність атомів Ge виступати в якості рекомбінаційних центрів пар Френкеля сприяє зменшенню швидкості введення не тільки А-центрів і дивакансій, але й тривакансій у провідну матрицю Si ⟨Ge⟩.

Досліджено кристали p-Si, вирощені методом Чохральського. Легуючою домішкою у вихідних кристалах були атоми бора в діапазоні концентрацій $(0{,}8 \div 3{,}5) \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$. Вміст Ge, як домішки, змінювався в межах $1 \cdot 10^{19}$–$1{,}5 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$. Концентрація кисню $N_{Oi} \approx$ $\approx (6{,}5 \div 7) \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ вимірювалася фур'є-інфрачервоним спектрометром, а вміст германію і бору у зразках Si визначався за допомогою мас-спектрометра.

Термовідпали зразків проводилися при 450 °C протягом 1–300 год в атмосфері повітря. При термовідпалах відбувалася $p \to n$ конверсія за рахунок утворення термодонорів. Вміст термодонорів у зразках визначався після термовідпалів шляхом вимірів ефекту Холла при 300 і 77 K.

У результаті проведених експериментів з'ясувалося, що навіть найменша із використаних концентрацій германію ($N_{Ge} \approx 1{,}0 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$) істотно впливала на генерацію електрично-активних термодонорів, а через них — і на електрофізичні властивості кремнію з ізовалентною домішкою Ge.

Термовідпали при 1250 °C протягом 2 год кристалів з ізовалентною домішкою Ge не приводили до повної ліквідації дефектної структури (якщо вона існувала у вихідному кристалі), а лише змінювали її за формою (дефекти після термовідпалу ставали меншими за розмірами, однак їх кількість зростала).

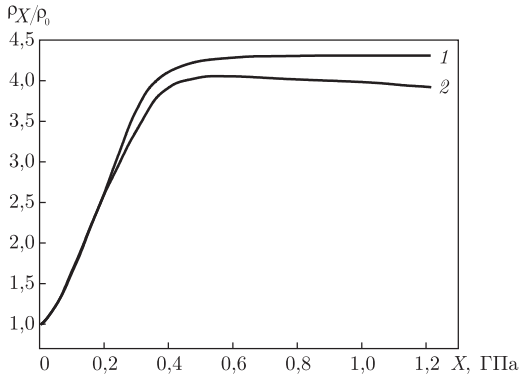

Рис. 2. Залежності тензоопору ρ_X/ρ_0 від величини механічного навантаження X, виміряні при $T = 77$ K, для кристалів: *1* — n-Si⟨P⟩ ($\rho_{300\text{K}} \approx 55{,}8$ Ом · см); *2* — n-Si⟨P + Ge⟩ ($\rho_{300\text{K}} \approx 56{,}3$ Ом · см)

Проведене на тих же зразках Si з домішкою атомів Ge дослідження кінетики утворення термодонорів дозволило переконатися в тому, що легуюча домішка Ge суттєво знижує ефективність цього процесу в n-Si ⟨Ge⟩.

Можна думати, що на перебіг описаних вище трансформацій певною мірою впливають пружні напруження, які виникають у матриці кристалів Si в околиці домішкових атомів Ge внаслідок відмінностей у розмірах ковалентних радіусів атомів матриці і домішки: $R_{Si} = 1{,}17$ Å, тоді як $R_{Ge} = 1{,}22$ Å. Крім того, наявність залишкової домішки кисню в кристалах Si, які вирощуються методом Чохральського (з домішкою Ge чи без неї), має надзвичайно важливе значення для тих змін, яких зазнають кристали під впливом термовідпалів.

Представляло інтерес проведення порівняльних дослідів на кристалах n-Si, легованих звичайною донорною домішкою фосфору ($n_e \equiv N_P \approx 7{,}15 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$, $\rho_{300\text{K}} \approx 55{,}8$ Ом· см), а також на кристалах з домішками фосфору та германію ($\rho_{300\text{K}} \approx 56{,}3$ Ом · см). Результати вимірів тензоопору на цих кристалах, як видно з рис. 2, помітно відрізнялися між собою: в дослідах з кристалами n-Si⟨P + Ge⟩ замість чіткого плато в області великих механічних напружень X проявилася тенденція до спаду $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ (рис. 2, крива *2*), тоді як у дослідах з кристалами n-Si ⟨P⟩ (рис. 2, крива *1*) було отримано чітке насичення тензоопору.

На рис. 3 наведено температурні залежності питомого опору кристалів n-Si з високою концентрацією домішки фосфору ($N_P \approx 3{,}98 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$), одержані при різних фіксованих значеннях одновісного тиску в інтервалі температур від 4,2 до 78 K. З рис. 3 видно, що за відсутності деформації (крива *1*) питомий опір зразка залишається сталим аж до азотних температур, підтверджуючи тим самим наявність перекриття домішкової зони із зоною провідності і, як наслідок цього — металічний тип провідності даного кристалу. По мірі росту величини механічних напружень (рис. 3, криві *2*–*7*) нахил кривих змінюється, що вказує на зміну енергії активації зі збільшенням X і на перехід від металічної (при нульовій і слабкій деформації) до активаційної провідності зразків n-Si у випадку одновісного стиску $\vec{X}$//[111]. Імовірно, що при високих значеннях X має місце "відрив" домішкової зони від дна зони провідності і перехід до провідності в зоні, сформованій підсистемою донорів, неупорядковано розподілених у матриці кристалу.

Таким чином, у вироджених кристалах n-Si, легованих домішкою фосфору, в області високих $\vec{X}$ // [111] одержано при 4,2 K перехід від металічної провідності до активаційної.

Підсумовуючи вищезазначене, можна зробити такі висновки. Встановлено, що введення домішки германію ($N_{Ge} = 2 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$) в Cz−Si n-типу підвищує його радіаційну стій-

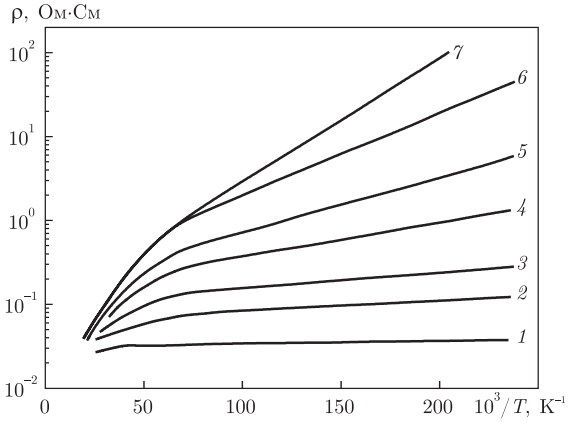

Рис. 3. Залежності питомого опору кристалів n-Si⟨P⟩ ($N_P \approx 3{,}98 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$) від температури в інтервалі 4,2–78 K при різних значеннях $\vec{X}$ // $\vec{J}$ // [111]. X, ГПа: *1* — 0; *2* — 1,6; *3* — 2,0; *4* — 2,4; *5* — 2,6; *6* — 2,8; *7* — 3,0

кість приблизно на порядок. Це зумовлено не тільки меншим середнім радіусом кластерів дефектів (40 Å в Si ⟨Ge⟩, на відміну від 70 Å в Cz–Si) за рахунок зниження теплопровідності матеріалу, але також зменшенням у ∼13 разів швидкості введення дивакансій (E_c — 0,42 еВ) та тривакансій (E_c — 0,49 еВ) у провідну матрицю Si ⟨Ge⟩. Припускається, що германій у кремнії є рекомбінаційним центром пар Френкеля, що пригнічує введення глибоких дефектів вакансійного типу.

При введенні ізовалентної домішки Ge в кристали кремнію в межах $1{\cdot}10^{19} \div 1{,}5{\cdot}10^{20}$ см$^{-3}$ і тривалих термовідпалах (до 300 год) при 450 °C у зразках кремнію p-типу (які були леговані домішкою бора в концентраціях $\sim (0{,}8 \div 3{,}5) \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$) відбувається $p \to n$ конверсія. Показано у дослідах із конвертованими зразками, що легування кристалів Si домішкою Ge суттєво знижує ефективність утворення термодонорів.

В області гелієвих температур реалізовано перехід від металічної провідності до активаційної шляхом деформаційної зміни зонної структури кристалів n-Si з високою концентрацією домішки фосфору, яка зумовлює радикальну перебудову домішкових станів і домішкових зон за цих умов.

Наведені результати вказують на те, що вони не можуть бути повністю незалежними від того, в яких умовах і з якою швидкістю охолоджуються зливки на кінцевій стадії їх вирощування, не говорячи вже про те, які легуючі і залишкові домішки (і в яких концентраціях) наявні в об'ємі вихідних зливків, з яких виготовляються зразки, призначені для дослідження ефективності і стабільності в часі кінцевих змін, що виникають у напівпровідниках у результаті їх термічних відпалів.

Цитована література

1. *Баранський П. І., Федосов А. В., Гайдар Г. П.* Неоднорідності напівпровідників і актуальні задачі міждефектної взаємодії в радіаційній фізиці і нанотехнології. – Київ-Луцьк: Вид. Луцького держ. техн. ун-ту, 2007. – 316 с.
2. *Мильвидский М. Г., Рытова Н. С., Соловьева Е. В.* Влияние упругой деформации, создаваемой примесями, на концентрацию и поведение собственных точечных дефектов в полупроводниках // Пробл. кристаллографии: К 100-летию со дня рождения акад. А. В. Шубникова. – Москва: Наука, 1987. – С. 215–232.
3. *Бринкевич Д. И., Маркевич В. П., Мурин Л. И., Петров В. В.* Кинетика образования термодоноров в кристаллах Si⟨Ge, O⟩ // Физика и техника полупроводников. – 1992. – **26**, № 4. – С. 682–690.

4. *Babich V. M., Valakh M. Ya., Kovalchuk V. B., Rudko G. Yu., Shakhraychuk N. I.* Photoluminescence and Electrical Properties of Germanium-Doped and Thermally Annealed Silicon // Phys. Stat. Sol. (A). – 1990. – **117**, No 2. – P. K185–K188.
5. *Бабич В. М., Баран Н. П., Зотов К. И., Кирица В. Л., Ковальчук В. Б.* Низкотемпературная диффузия кислорода и образование термодоноров в кремнии, легированном изовалентной примесью германия // Физика и техника полупроводников. – 1995. – **29**, № 1. – С. 58–64.
6. *Бабич В. М., Блецкан Н. И., Венгер Е. Ф.* Кислород в монокристаллах кремния. – Київ: Інтерпрес ЛТД, 1997. – 240 с.
7. *Бабич В. М., Баран Н. П., Бугай А. А., Зотов К. И., Максименко В. М.* Образование и свойства акцепторных центров при термообработке кислородсодержащего кремния // Укр. фіз. журн. – 1992. – **37**, № 10. – С. 1552–1556.
8. *Грибов Б. Г., Блецкан Н. И.* Большие монокристаллы кремния, проблемы и перспективы развития. Тезисы 1-й Всесоюз. конф. "Физические и физико-химические основы микроэлектроники". – Вильнюс, Литва 1987. – С. 29–31.
9. *Хируненко Л. И., Шаховцов В. И., Шинкаренко В. К., Шпинар Л. И., Ясковец И. И.* Особенности процессов радиационного дефектообразования в кристаллах Si⟨Ge⟩ // Физика и техника полупроводников. – 1987. – **21**, № 3. – С. 562–565.
10. *Хируненко Л. И., Шаховцов В. И., Шумов В. В.* Радиационное дефектообразование в кремнии, легированном германием, при низкотемпературном облучении // Физика и техника полупроводников. – 1998. – **32**, № 2. – С. 132–134.
11. *Watkins G. D.* A Microscopic View of Radiation Damage in Semiconductors Using EPR as a Probe. Invited Paper // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1969. – **16**, No 6. – P. 13–18.
12. *Budtz-Jorgensen C. V., Kringhoj P., Larsen N. A., Abrosimov N. V.* Deep-Level Transient Spectroscopy of the Ge-Vacancy Pair in Ge-Doped n-Type Silicon // Phys. Rev. B. – 1998. – **58**, No 3. – P. 1110–1113.
13. *Помозов Ю. В., Соснин М. Г., Хируненко Л. И., Яшник В. И., Абросимов Н. В., Шредер В., Хене М.* Кислородосодержащие радиационные дефекты в $Si_{1-x}Ge_x$ // Физика и техника полупроводников. – 2000. – **34**, № 9. – С. 1030–1034.
14. *Dolgolenko A. P., Litovchenko P. G., Varentsov M. D., Gaidar G. P., Litovchenko A. P.* Particularities of the Formation of Radiation Defects in Silicon with Low and High Concentrations of Oxygen // Phys. Stat. Sol. (B). – 2006. – **243**, No 8. – P. 1842–1852.
15. *Goedecker S., Deutsch Th., Billard L.*A Fourfold Coordinated Point Defect in Silicon // Phys. Rev. Lett. – 2002. – **88**, No 23. – P. 235501–235505.

References

1. *Baranskii P. I., Fedosov A. V., Gaidar G. P.* Heterogeneities of semiconductors and urgent problems of the interdefect interaction in the radiation physics and nanotechnology, Kyiv–Lutsk: Lutsk State Technical University, 2007 (in Ukrainian).
2. *Mil'vidskii M. G., Rytova N. S., Solov'eva E. V.* The problems of crystallography: To 100-th anniversary of acad. A. V. Shubnikov, Moscow: Nauka, 1987: 215–232 (in Russian).
3. *Brinkevich D. I., Markevich V. P., Murin L. I., Petrov V. V.* Fizika i tekhnika poluprovodnikov, 1992, **26**, No 4: 682–690 (in Russian).
4. *Babich V. M., Valakh M. Ya., Kovalchuk V. B., Rudko G. Yu., Shakhraychuk N. I.* Phys. Stat. Sol. (A), 1990, **117**, No 2: K185–K188.
5. *Babich V. M., Baran N. P., Zotov K. I., Kiritsa V. L., Kovalchuk V. B.* Fizika i tekhnika poluprovodnikov, 1995, **29**, No 1: 58–64 (in Russian).
6. *Babich V. M., Bletskan N. I., Venger E. F. Oxygen in* silicon single crystals, Kiev: Interpres LTD, 1997 (in Russian).
7. *Babich V. M., Baran N. P., Bugai A. A., Zotov K. I., Maximenko V. M.* Ukr. J. Phys., 1992, **37**, No 10: 1552–1556 (in Russian).
8. *Gribov B. G., Bletskan N. I.* Large single crystals of silicon, problems and perspectives of development. Abstracts of the 1 st All-Union Conf. of "Physical and physico-chemical fundamentals of microelectronics", Vilnyus, Lithuania, 1987: 29–31 (in Russian).
9. *Khirunenko L. I., Shakhovtsov V. I., Shinkarenko V. K., Shpinar L. I., Yaskovets I. I.* Fizika i tekhnika poluprovodnikov, 1987, **21**, No 3: 562–565 (in Russian).

10. *Khirunenko L. I., Shakhovtsov V. I., Shumov V. V.* Fizika i tekhnika poluprovodnikov, 1998, **32**, No 2: 132–134 (in Russian).
11. *Watkins G. D.* IEEE Trans. Nucl. Sci., 1969, **16**, No 6: 13–18.
12. *Budtz-Jorgensen C. V., Kringhoj P., Larsen N. A., Abrosimov N. V.* Phys. Rev. B, 1998, **58**, No 3: 1110–1113.
13. *Pomozov Yu. V., Sosnin M. G., Khirunenko L. I., Yashnik V. I., Abrosimov N. V., Shreder V., Khene M.* Fizika i tekhnika poluprovodnikov, 2000, **34**, No 9: 1030–1034.
14. *Dolgolenko A. P., Litovchenko P. G., Varentsov M. D., Gaidar G. P., Litovchenko A. P.* Phys. Stat. Sol. (B), 2006, **243**, No 8: 1842–1852.
15. *Goedecker S., Deutsch Th., Billard L.* Phys. Rev. Lett., 2002, **88**, No 23: 235501–235505.

Надійшло до редакції 19.01.2016

Г. П. Гайдар[1], П. И. Баранский[2]

[1]Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев
[2]Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины, Киев

E-mail: gaydar@kinr.kiev.ua

Влияние изовалентной примеси Ge и термоотжигов на электрофизические свойства кристаллов кремния

В образцах Cz–Si *n-типа, легированных изовалентной примесью германия, выявлено существенное снижение эффективности образования термодоноров в процессе термоотжигов, а также установлено повышение радиационной стойкости приблизительно на порядок при облучении n-*Si ⟨Ge⟩ *быстрыми нейтронами реактора.*

Ключевые слова: кремний, изовалентная примесь, германий, термоотжиг, облучение, быстрые нейтроны, радиационная стойкость.

G. P. Gaidar[1], P. I. Baranskii[2]

[1]Institute for Nuclear Research of the NAS of Ukraine, Kiev
[2]V. Ye. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the NAS of Ukraine, Kiev

E-mail: gaydar@kinr.kiev.ua

Influence of Ge isovalent impurity and thermoannealings on the electrophysical properties of silicon crystals

In n-type Cz–Si *samples doped by the germanium isovalent impurity, a significant decrease in the efficiency of formation of thermodonors in the thermoannealing process is found, as well as an increase of the radiation hardness by order of magnitude under the irradiation of n-*Si ⟨Ge⟩ *by fast-pile neutrons is established.*

Keywords: silicon, isovalent impurity, germanium, thermoannealing, irradiation, fast neutrons, radiation hardness.