

УДК 621.382.333:621.315.592.3

Радіаційна стійкість тестових pnp транзисторів ІС з діелектричною ізоляцією, виготовлених на кремнії, ізовалентно легovanому германієм (SiGe)

Биткін С. В., Критська Т. В.

Інженерний учбово-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету, м. Запоріжжя, Україна

E-mail: bytkin@bigmir.net

Складлася суперечлива оцінка можливості застосування германія (Ge) для підвищення радіаційної стійкості однорідно легovanого ізовалентною домішкою кремнію (Si). У ряді публікацій показано, що існує лише обмежений вплив легування германієм на радіаційну стійкість pnp-структури при високоенергетичному електронному опроміненні. Одночасно, спостерігається помітне покращення радіаційної стійкості pnp-структур, виготовлених на SiGe, при γ -опроміненні. З метою зняття протиріччя, проведено порівняння радіаційної деградації β тестових біполярних транзисторних pnp-структур інтегральних схем (ІС), виготовлених за однаковою технологією, «кремній з діелектричною ізоляцією», на ізовалентно легovanому германієм кремнії, SiGe, з різним вмістом Ge, $N_{Ge} = 1,2 \cdot 10^{19} \dots 1,2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Коефіцієнт статичного посилення β виміряний до та після опромінення α -частинками. Опромінення не корпусованих pnp-структур α -частинками з енергією 4,5 MeV, проведено у спеціально спроектованій та виготовленій лабораторній установці з використанням радіоізотопних джерел; експериментально досліджено pnp-структури з двома товщинами бази, 0,25 і 0,35 мкм. Залежність, що апроксимує експериментальні дані $\beta(\Phi_\alpha)$ – рівняння, що описує зміну коефіцієнта посилення транзисторної pnp-структури при α -опроміненні, отримана з використанням програми OriginPRO. Результати для pnp-структур з товщиною бази 0,25 мкм показують сильну нелінійну залежність рівнянь $\beta(\Phi_\alpha)$ від N_{Ge} . Деградація коефіцієнта посилення контрольних транзисторів, виготовлених за стандартною технологією ($N_{Ge} = 0$), описується S-образною залежністю. Опромінення pnp-структур, сформованих на пластинах SiGe з різним рівнем легування ізовалентною домішкою призводить до повної зміни характеру залежності. Для $\Phi_\alpha \leq 10^{11} \text{ см}^{-2}$ характер зміни β практично однаковий для структур, виготовлених на пластинах з $N_{Ge} = 0$ та $N_{Ge} = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а також $N_{Ge} = 1,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ та $N_{Ge} = 1,2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. При збільшенні $\Phi_\alpha \geq 10^{11} \text{ см}^{-2}$ спостерігається прискорена деградація коефіцієнта посилення pnp-структур, виготовлених на пластинах $N_{Ge} = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Цей рівень легування кремнію германієм не прийнятний з погляду підвищення радіаційної стійкості Si. При $\Phi_\alpha \leq 10^{14} \text{ см}^{-2}$ радіаційна стійкість pnp-структур, виготовлених на пластинах SiGe з $N_{Ge} = 1,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ приблизно в два рази нижче, ніж у контрольних структур з $N_{Ge} = 0$. Для транзисторів з товщиною бази 0,35 мкм відсутній ефект зміни характеру деградації $\beta(\Phi_\alpha)$. Спостерігається залежність, що підтверджує можливість уповільнення радіаційної деградації значення коефіцієнта посилення pnp-структур, виготовлених на SiGe. Підвищення радіаційної стійкості в 2...3 рази для тестових транзисторів, виготовлених на пластинах SiGe, легованих $N_{Ge} = 7,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, спостерігається в широкому діапазоні доз α -опромінення, $10^{11} \leq \Phi_\alpha \leq 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Ключові слова: підвищення радіаційної стійкості; pnp структура; α -опромінення; легування кремнію германієм; рівень легування ізовалентною домішкою; деградація коефіцієнта посилення

DOI: [10.20535/RADAP.2023.91.72-78](https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.91.72-78)

Постановка проблеми у загальному вигляді

Необхідність використання космічних засобів зв'язку, розвідки, спостереження та рекогносцировки (communications, intelligence, surveillance and

reconnaissance, ISR) [1], особливо технології супутникового дистанційного зондування (Satellite Remote Sensing) [2], розглядається як своєрідний «катализатор» [3] розвитку промисловості космічних засобів дистанційного зондування [4]. Показано, що досить часто спостерігаються відмови твердотільних підсилювачів потужності (Solid State

Power Amplifiers, SSPAs), критично важливих пристроїв, необхідних для посилення радіосигналів та передачі інформації із супутника [5]. Це важливо з огляду на те, що прогнозована тривалість життя космічних апаратів (КА) у мегагрупованнях на низьких, на висоті 300...900 км над Землею орбітах (Low Earth Orbits, LEO), зазвичай складає 3-5 років [6]. Тривалість активного існування апаратури КА багато в чому визначається радіаційною стійкістю мікроелектронних пристроїв – деградація підсилювальних властивостей транзисторів у полях іонізуючого випромінювання призводить до зміни (дрейфу) характеристик інтегральних схем (ІС) загалом та їх функціональних відмов [7]. На поточні супутникові угруповання істотно впливає космічна погода [8], прогнозування її недостатньо ефективне [9]. Спостерігається суттєвий вплив радіаційної обстановки на ризики відмов електронного обладнання КА [10]. Активно розвиваються дослідження, проектування і виробництво атомних електростанцій (АЕС) IV покоління (Generation IV) [11]. У зв'язку зі складністю нових реакторів потрібне розміщення датчиків та пов'язаної з ними електроніки ближче до активної зони ядерного реактора, що матиме відчутний вплив на управління та роботу реактора [12], за рахунок чого підвищиться його безпека та ефективність. Особливо важливою є радіаційна стійкість обладнання моніторингових систем при усуненні наслідків радіаційних інцидентів на АЕС [13]. Таким чином, актуальною є розробка технологій підвищення радіаційної стійкості елементної компонентної бази (ЕКБ) будь-якої апаратури (КА, АЕС), що використовується в полях іонізуючих випромінювань.

1 Аналіз останніх досліджень та публікацій

Досить детально вивчено фізичний механізм деградації властивостей напівпровідникових матеріалів, що використовуються для виготовлення як ІС, так і дискретних пристроїв [14, 15]. Сегментація структури використання напівпровідників у системах радіоелектронної боротьби, радіолокації та зв'язку приведена в [16]. У доступному для огляду майбутньому (далі 2030 р.) частка не широкосмугових напівпровідників, що буде застосована для малопотужних радіочастотних (radiofrequency, RF) цифрових приладів у військовій радіотехніці буде складати не менш 50%. Таким напівпровідником може бути ізовалентно легований германієм кремній, SiGe [17]. Розглянуто можливість розробки та виготовлення нового покоління електронних підсистем обладнання радіоелектронної боротьби (electronic warfare, EW), для виробництва якої доцільно застосування ЕКБ з використанням SiGe [18]. Ізовалентна домішка створює можливість для керування шириною забороненої зони кремнію

(bandgap engineering) [19]. Саме цей ефект застосовується, наприклад, для виготовлення широкосмугових ($\cong 20 \text{ MHz} \dots 20 \text{ GHz}$) передавачів, призначених для роботи EW в екстремальних умовах, у тому числі космічного простору [20], для чого використовуються біполярні транзистори з гетеропереходом (SiGe Heterojunction Bipolar Transistors, HBTs).

Методом емнісної спектроскопії глибоких енергетичних рівнів (deep level transient spectroscopy, DLTS) досліджено діодні структури (p-on-n diodes), виготовлені із застосуванням SiGe, з концентрацією германію 10^{19} cm^{-3} та опромінені електронами з енергією 2 MeV [21, 22]. Результати опромінення дозою 10^{14} cm^{-2} показали, що концентрація радіаційних дефектів практично не відрізняється для контрольних діодних структур та виготовлених із застосуванням ізовалентно легovanого германієм кремнію. Отриманий результат якісно збігається з даними, отриманими в [23] при опроміненні тестових p^+n структур α -частинками з енергією $\sim 4,5 \text{ MeV}$ при $\Phi_\alpha \cong 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Зокрема, при $\Phi_\alpha \cong 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ концентрація А- та Е-центрів в кремнії, легovanому Ge, суттєво нижче, ніж у контрольних зразках. При $5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \leq \Phi_\alpha \leq 2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ в SiGe спостерігається активне накопичення А-центрів, а при $\Phi_\alpha \cong 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ їх концентрація не відрізняється від виміряної в контрольних зразках. Для Е-центрів при $3 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2} \leq \Phi_\alpha \leq 2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ в SiGe спостерігається їх активне накопичення. Разом з тим, при $\Phi_\alpha > 2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ у легovanому германієм кремнії відбувається стабілізація концентрацій А- та Е-центрів, що дозволяє говорити про радіаційну стійкість SiGe при підвищених дозах α -опромінення. Проведення вимірювань за однієї концентрації Ge, 10^{19} cm^{-3} , недостатньо для оцінки радіаційної стійкості SiGe, оскільки фізичні властивості цього матеріалу істотно залежать від його складу (структури). Наприклад, у роботі [24] досліджено час життя не основних носіїв заряду у вирощених по Чохральському монокристалах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в структурному діапазоні $0 < x < 0,07$ і встановлено, що він різко знижується із збільшенням концентрації Ge, та може бути пояснено утворенням складних структурних дефектів [25].

2 Виявлення невіршених науково-технічних завдань

Склалася суперечлива оцінка можливості застосування Ge для підвищення радіаційної стійкості однорідно легovanого ізовалентною домішкою кремнію. З одного боку, у роботах [26, 27] показано, що легування кремнію германієм у діапазоні концентрацій від 10^{16} до 10^{19} cm^{-3} покращує якість монокристалів та пластин, оскільки підвищує їх механічну міцність, що призводить до зниження втрат пластин через руйнування під час різання зливка та

їх високотемпературної термічної обробки під час проведення технологічного процесу. Важливою перевагою є те, що сам процес витягування кристалів не потребує будь-якої модифікації для концентрацій $Ge < 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Однак спостерігається лише обмежений вплив легування германієм на характеристики тестових діодів до і після електронного опромінення, що підтверджує, на думку авторів цитованих робіт, що легування кремнію низькою концентрацією германію не істотно впливає на радіаційну стійкість рп-структури. З іншого боку, показано помітне покращення радіаційної стійкості рп-структур, виготовлених на SiGe при γ -опроміненні [28]. Отже, необхідне порівняльне експериментальне дослідження багат шарових планарних структур, радіаційна стійкість яких визначається матеріалом, на якому вони сформовані. Іншими словами, необхідне порівняння структур, виготовлених за однаковою технологією на ізовалентно легованому германієм кремнію SiGe з різним вмістом Ge; такою структурою є біполярний транзистор (bipolar junction transistor, BJT) [29]. Фактично, в даному випадку рп-структура буде датчиком ступеня радіаційної деградації SiGe при використанні однакових доз опромінення та режимів вимірювання для контрольних (концентрація германію $N_{Ge} = 0$) та досліджуваних структур ($N_{Ge} \neq 0$). У схемі із загальним емітером найбільш чутливою до радіаційного впливу характеристикою є відношення колекторного струму BJT, I_C , к базовому току, I_B , тобто коефіцієнт підсилення транзистора $\beta = I_C/I_B$, званий також коефіцієнтом посилення по постійному струму (DC current gain), h_{FE} .

3 Мета роботи

Експериментальне дослідження впливу концентрації ізовалентної легуючої домішки, Ge, на радіаційну деградацію найбільш чутливої характеристики біполярних транзисторів, β , виготовлених на ізовалентно легованому германієм кремнію, SiGe, з метою з'ясування можливості використання германію для підвищення радіаційної стійкості кремнієвих планарних рп-структур.

4 Виклад основного матеріалу

При проведенні досліджень використовували монокристали кремнію з $\rho \approx 0,2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, вирощені за методом Чохральського [30]. Проводився контроль питомого опору, щільності дислокацій, наявності свірлових дефектів. Вимірювання N_{Ge} проводилися в Інституті фізики НАНУ за відомою методикою [31]. Вимірювання вмісту O_i та C_i проведено методом ІЧ-поглинання з використанням спектрофотометра PerkinElmer 580 при 300 К (концентрація кисню та вуглецю по верхньому/нижньому тор-

цам дорівнювала $(2,8 \dots 3,2) \cdot 10^{17} / (5 \dots 6) \cdot 10^{16} \text{ см}^3$ та $(3,5 \dots 3,8) \cdot 10^{12} / (2 \dots 3) \cdot 10^{16} \text{ см}^3$). З точки зору виготовлення, опромінення та проведення вимірювань як до, так і після опромінення зручно використовувати біполярний тестовий рп-транзистор IC, виготовлений на ізовалентно легованому германієм кремнію за технологією «кремній з діелектричною ізоляцією», що застосовується для виготовлення радіаційно стійких IC [32]. Схема ізоляції за допомогою V-подібних канавок, заповнених полікристалічним кремнієм (VIP-метод), заснована на вертикальному анізотропному травленні кремнієвих підкладок з утворенням V-подібних канавок, заповнених полікристалічним кремнієм. Після формування ізольованих областей («кишень») монокристалічного кремнію SiGe за технологією 185 PУ5 сформовані рп-структури з товщинами бази 0,25 та 0,35 мкм, площа емітера $S_E = 65 \times 35 \text{ мкм}^2$. Для вивчення радіаційної деградації коефіцієнта підсилення β активних рп-структур IC часто використовується α -випромінювання радіонуклідних джерел [33], це так званий імітаційний підхід. В цій роботі опромінення не корпусованих тестових рп-структур проводилося у спеціально розробленій та виготовленій лабораторній установці з використанням радіоізотопних джерел α -випромінювання АИП-Н (ізотопний склад плутонію: 80% ^{238}Pu , 15,8% ^{239}Pu , 4,2% ^{240}Pu , решта ^{241}Pu , ^{242}Pu). При радіоактивному розпаді виникають α -частки з енергією $\cong 4,5 \text{ MeV}$, які мають пробіг у кремнії 20...25 мкм, тобто здатні відносно однорідно проникати в активні області рп-структур. Безпосередньо вимірювання β до та після опромінення тестових структур (розрахунок Φ_α -дозы α -опромінення проводився із використанням паспортних даних джерел) проводилися із застосуванням вимірювача статичних вольт-амперних характеристик планарних рп-структур [34], підключеного до стандартної багатозондової установки. Похибка вимірювань складала 3%...5%. Режим вимірів застосовувався такий: $V_{CE} = 5,5 \text{ V}$; $I_E \cong I_C \leq 5 \text{ mA}$. Проведення опромінення не передбачало наявності електричного режиму на тестовій структурі (напряга живлення, імпульсні сигнали на вході/виході IC). Залежність, що апроксимує експериментальні дані ($\beta(\Phi_\alpha)$ – рівняння, що описує зміну коефіцієнта посилення транзисторної рп-структури при α -опроміненні), отримана з використанням програми OriginPRO [35].

Деградація коефіцієнта посилення контрольних транзисторів, виготовлених за стандартною технологією ($N_{Ge} = 0$), описується [36] рівнянням виду:

$$\beta_{N_{Ge}=0}(\Phi_\alpha) = A_{2N_{Ge}=0} + \frac{A_{1N_{Ge}=0} - A_{2N_{Ge}=0}}{\left(1 + \frac{\Phi_\alpha}{1,04542 \cdot 10^{11}}\right)^{1,41382}}, \quad (1)$$

де $A_{1N_{Ge}=0} = 414,43858$; $A_{2N_{Ge}=0} = 13,72586$.

Опромінення рп-структур, сформованих на пластинах SiGe з різним рівнем легування

Табл. 1 Залежність коефіцієнтів рівняння $\beta_{N_{Ge} \neq 0}(\Phi_\alpha)$ від концентрації Ge у вихідній кремнієвій пластині

Концентрація Ge, cm^{-3}	$1,2 \cdot 10^{19}$	$2,5 \cdot 10^{19}$	$1,2 \cdot 10^{20}$
$\beta_{N_{Ge} \neq 0_START}$	243,84124	465,80687	213,97619
$\beta_{N_{Ge} \neq 0_END}$	4,96195	$\cong 0$	21,60462
n	0,98501	0,83524	0,96638
k	$6,27842 \cdot 10^{10}$	$5,66953 \cdot 10^{10}$	$1,65227 \cdot 10^{11}$

ізовалентною домішкою призводить до повної зміни характеру залежності (функція Hill [37] в OriginPRO):

$$\beta_{N_{Ge} \neq 0}(\Phi_\alpha) = \beta_{N_{Ge} \neq 0_START} + \left(\beta_{N_{Ge} \neq 0_END} - \beta_{N_{Ge} \neq 0_START} \right) \times \frac{\Phi_\alpha^{n(N_{Ge})}}{k(N_{Ge})^{n(N_{Ge})} + \Phi_\alpha^{n(N_{Ge})}}, \quad (2)$$

де чисельні значення параметрів рівняння (2) наведено у Табл. 1:

Отримані залежності зручно порівняти, побудувавши їх у MathCAD. Для $\Phi_\alpha \leq 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ характер зміни β практично однаковий для структур, виготовлених на пластинках з $N_{Ge} = 0$ та $N_{Ge} = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, а також $N_{Ge} = 1,2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ та $N_{Ge} = 1,2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. При збільшенні $\Phi_\alpha \geq 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ спостерігається прискорена деградація коефіцієнта підсилення прп-структур, виготовлених на пластинках $N_{Ge} = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, Рис. 1. Отже, цей рівень легування кремнію германієм не прийнятний з погляду підвищення радіаційної стійкості Si.

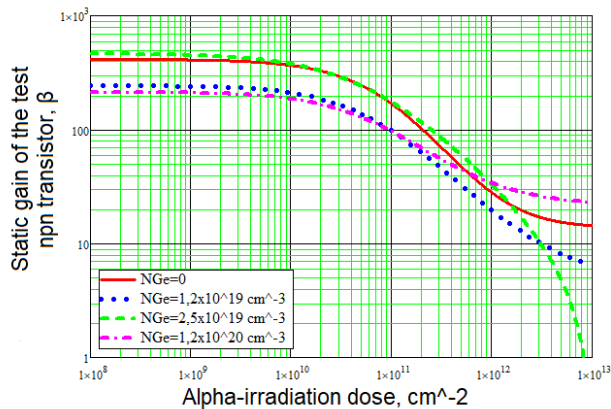


Рис. 1. Деградація підсилювальних властивостей тестової прп-структури (товщина бази 0,25 мкм), на монокристалічних пластинках SiGe з різною концентрацією германію при α -опроміненні

При $\Phi_\alpha \leq 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ радіаційна стійкість прп-структур, виготовлених на пластинках SiGe с $N_{Ge} = 1,2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, приблизно в два рази нижче, ніж у контрольних структур ($N_{Ge} = 0$); з прикладної точки зору необхідний матеріал, що забезпечує уповільнення деградації при великих дозах опромінення, але таку вимогу для «вузької» бази практично не задовольняє навіть SiGe с $N_{Ge} = 1,2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, Рис. 2:

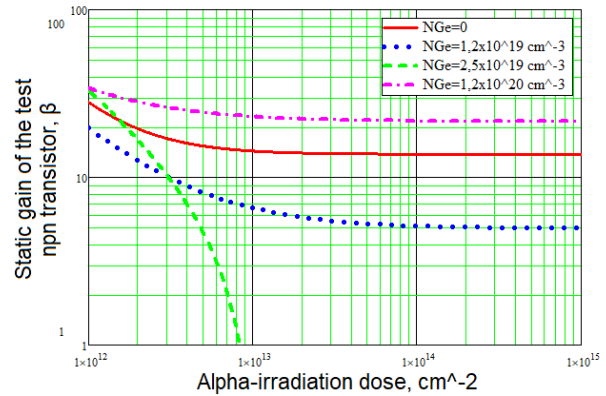


Рис. 2. Деградація β тестової прп-структури (товщина бази 0,25 мкм), виготовленої на монокристалічних пластинках SiGe з різною концентрацією германію при $\Phi_\alpha \geq 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

Для прп-структур з товщиною бази 0,35 мкм результати обробки експериментальних даних з радіаційної деградації β при дії опромінення з використанням програми OriginPRO мають вигляд, приведений в Табл. 2:

Залежність β від потоку α -частинок підтверджує можливість уповільнення радіаційної деградації значення коефіцієнта підсилення прп-структур на SiGe (Рис. 3):

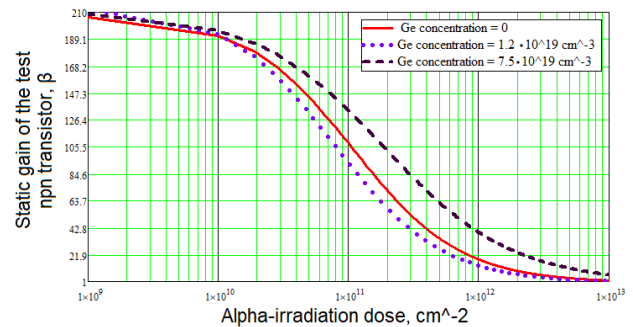


Рис. 3. Деградація β тестових прп-структур, виготовлених на SiGe з різним вмістом германію (див. легенду до графіка) при дії α -випромінювання з енергією $\approx 4,5 \text{ MeV}$ (товщина бази 0,35 мкм)

Для транзисторів з «широкою» базою не спостерігається ефекту зміни характеру деградації β прп-структур, спостерігається так звана "логістична функція з п'ятьма параметрами" (five parameters logistic function) [38]. Підвищення радіаційної стійкості в 2-3 рази для тестових транзисторів, виготовлених на пластинках SiGe, $N_{Ge} = 7,5 \cdot$

Табл. 2 Коефіцієнти рівняння, що описують деградацію β pnp-структур, виготовлених на SiGe з різною концентрацією германію, N_{Ge}

Загальний вид рівняння	Параметр	N_{Ge}, cm^{-3}		
		0	$1,3 \cdot 10^{19}$	$7,5 \cdot 10^{19}$
$\beta = \frac{A_{min} + (A_{max} - A_{min})}{1 + \left(\left(\frac{x_0}{x}\right)^{-h}\right)^s}$	A_{min}	2,18988	$\cong 0$	0,9266
	A_{max}	207,32619	214,99176	210,52311
	x_0	$1,08682 \cdot 10^{11}$	$7,71757 \cdot 10^{10}$	$1,87228 \cdot 10^{11}$
	h	0,94929	1,16223	0,80807
	s	1,11324	0,9124	1,0899

10^{19}cm^{-3} , спостерігається в широкому діапазоні доз α -опромінення, Рис. 4:

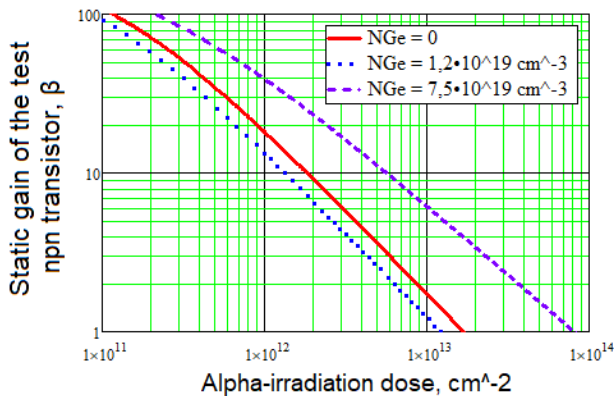


Рис. 4. Деградація β тестових pnp-структур, виготовлених на пластинах SiGe з різною концентрацією Ge при $10^{11} \leq \Phi_{\alpha} \leq 10^{14} \text{cm}^{-2}$ (товщина бази 0,35 мкм)

Висновки з проведеного дослідження та перспективи подальшого пошуку

Підтверджено можливість підвищення радіаційної стійкості pnp-структур ІС із відносно широкою базою (0,35 мкм) на пластинах SiGe, легованих германієм до $N_{Ge} = 7,5 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$. Ефект спостерігається у широкому діапазоні доз α -опромінення. Показано, що використання $N_{Ge} = 1,2 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$, $2,5 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$ суттєво знижує радіаційну стійкість тестових pnp-структур.

Отримані результати вказують на необхідність проведення додаткових досліджень у двох напрямках. По-перше, необхідна розробка фізичної моделі, яка пояснює механізм зміни радіаційної деградації коефіцієнта посилення β в залежності від концентрації Ge та ширини pnp-бази транзистора. По-друге, необхідно провести розрахунки зміни вихідної напруги низького рівня ("логічного нуля", U_{OL}), вихідного інвертора логічної ІС з використанням отриманих залежностей $\beta(\Phi_{\alpha})$ для підтвердження можливості суттєвого підвищення радіаційної стійкості не тільки тестової pnp-структури, а й схем,

що її використовують. У разі отримання суттєво позитивних результатів доцільно виготовити дослідну партію ІС на пластинах SiGe з $N_{Ge} = 7,5 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$ і провести її радіаційні випробування на моделюючій установці.

References

- [1] Bos T., Banducci M. M., et al. under the direction of the Chairman of the Joint Chiefs of Staff (CJCS). (2020). *Space Operations*.
- [2] Thompson L. B. (2021). Geospatial Intelligence. A Test Case for Washington's Emerging Industrial Policy. *Lexington Institute*.
- [3] Magnuson S. (2022). Ukraine War Called 'Catalyst' for Space-Based Remote Sensing Industry. *National Defense*.
- [4] Dubovik O., Schuster G. L., Xu F., Hu Y., Bösch H., Landgraf J. and Li Z. (2021). Grand Challenges in Satellite Remote Sensing. *Frontiers in Remote Sensing*, Vol. 2, 619818. doi: 10.3389/frsen.2021.619818.
- [5] Green, J. C., Likar, J. and Shprits Y. (2017). Impact of space weather on the satellite industry. *Space Weather*, Vol. 15, Iss. 6, pp. 804–818. doi: 10.1002/2017SW001646.
- [6] Zhang J., Cai Y., Xue C., Xue Z., and Cai H. (2022). LEO Mega Constellations: Review of Development, Impact, Surveillance, and Governance. *Space: Science & Technology*, Volume 2022, Article ID 9865174, 17 p. doi: 10.34133/2022/9865174.
- [7] Zebrev, G. (2010). Radiation Effects in Silicon High Scaled Integrated Circuits. National Research Nuclear University *MEPHI*. DOI:10.13140/2.1.1278.9442.
- [8] Space Weather Science and Observation Gap Analysis for the National Aeronautics and Space Administration (NASA) (Sep. 2020-Apr. 2021). A Report to NASA's Space Weather Science Application Program. *NASA*.
- [9] Zastrow M. (2020). How to Improve Space Weather Forecasting. *Eos*, 101. doi: 10.1029/2020EO145780.
- [10] Martines, L. M. S. (2011). Analysis of LEO Radiation Environment and its Effects on Spacecraft's Critical Electronic Devices. *Doctoral Dissertations and Master's Theses*, 102.
- [11] Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems. (2014). Issued by the OECD Nuclear Energy Agency for the *Generation IV International Forum*.

- [12] Reed F. K., Ezell N. D. B., Ericson M. N., Britton C. L., Jr. (2020). Radiation-Hardened Electronics for Reactor Environments. *Oak Ridge National Laboratory*.
- [13] Huang, Q. (2019). Investigation of radiation-hardened design of electronic systems with applications to post accident monitoring for nuclear power plants. *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, 6025.
- [14] Iniewski, K. (2018). Radiation Effects in Semiconductors (1st ed.). *CRC Press*.
- [15] Baumann R., Kruckmeyer K. (2020). Radiation Handbook for Electronics. A compendium of radiation effects topics for space, industrial and terrestrial applications. *Texas Instruments*, 118 p.
- [16] Higham E. (2021). Defense Market Trends and the Impact on Semiconductor Technology. *Microwave Journal*.
- [17] Ranita Basu (2022). A review on single crystal and thin film Si-Ge alloy: growth and applications. *Materials Advances*, Vol. 3, pp. 4489-4513. DOI: 10.1039/D2MA00104G.
- [18] Lambrechts W. & Sinha S. (2017). SiGe-based Re-engineering of Electronic Warfare Subsystems. Part of the book series: Signals and Communication Technology (SCT). *Springer Cham*, 329 p. DOI: 10.1007/978-3-319-47403-8.
- [19] Singh R., Harame D. L., Oprysko M. M. (2004). Silicon Germanium: Technology, Modeling and Design. *Wiley-IEEE Press*, 371 p.
- [20] Cressler J. D. (2010). Silicon-Germanium as an Enabling Technology for Extreme Environment Electronics. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Vol. 10, No. 4, pp. 437-448. doi: 10.1109/TDMR.2010.2050691.
- [21] Chen J., Vanhellemont J., Simoen E., et al. (2011). Electron irradiation induced defects in germanium-doped Czochralski silicon substrates and diodes. *Pys. Status Solidi C*, Vol. 8, Iss. 3, pp. 674-677. DOI: 10.1002/pssc.201000142.
- [22] Uleckas A., Gaubas E., Rafi J. M., Chen J., Yang D., Ohyama H., Simoen E. and Vanhellemont J. (2011). Carrier Lifetime Studies in Diode Structures on Si Substrates with and without Ge Doping. *Solid State Phenomena*, Vols. 178-179, pp 347-352. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.178-179.347.
- [23] Bytkin S., Kritskaya T. (2018). Modeling of S-shaped accumulation process A- and E-centers in isovalent doped germanium silicon in statistica and mathcad environment. *Modern problems of metallurgy*, No. 21, pp. 29-35. DOI: 10.34185/1991-7848.2018.01.06.
- [24] Ulyashin A. G., Abrosimov N. V., Bentzen A., et al. (2006). Ge composition dependence of the minority carrier lifetime in monocrystalline alloys of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 9, pp. 772-776. doi:10.1016/j.mssp.2006.08.021.
- [25] Argunova T. S., Jeb J. H., Kostina L. S., Rozhkov A. V. and Grekhov I. V. (2013). $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ Single Crystals Grown by the Czochralski Method: Defects and Electrical Properties. *ACTA PHYSICA POLONICA A*, Special Anniversary Issue: Professor Jan Czochralski Year 2013 – Invited Paper, Vol. 124. No. 2, pp. 239-243. DOI: 10.12693/APhysPolA.124.239.
- [26] Vanhellemont J., Chen J., Xu W., Yang D., Rafi J. M., Ohyama H., and Simoen E. (2010). Germanium Doping of Si Substrates for Improved Device Characteristics and Yield. *ECS Transactions*, Vol. 27, Iss. 1, pp. 1041-1046. DOI: 10.1149/1.3360748.
- [27] Vanhellemont J., Chen J., Lauwaert J., Vrielinck H., Xu W., Yang D., Rafi J. M., Ohyama H., Simoen E. (2010). Germanium doping for improved silicon substrates and devices. *Preprint submitted to Journal of Crystal Growth*.
- [28] Bytkin S. V., Krytskaja T. V., Radin E. G., Goncharov V. I., Kunitskij Yu. I., Kobeleva S. P. (2012). Eksperimental'noe issledovanie harakteristik tiristorov, izgotovlennykh na $\text{Si}<\text{Ge}>$, pri dejstvii gamma-oblucheniya [An Experimental Study of the Characteristics of Thyristors, Manufactured on CZ-Si<Ge>, Under the Action of Gamma-Irradiation]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki [Materials of Electronics Engineering]*, Vol. 3, pp. 45-48. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2012-3-45-48>.
- [29] Santos, L. A. P. (2022). An Overview on Bipolar Junction Transistor as a Sensor for X-ray Beams Used in Medical Diagnosis. *Sensors*, Vol. 22, Iss. 5, 1923. doi:10.3390/s22051923.
- [30] Silicon, Germanium, and Their Alloys. Growth, Defects, Impurities, and Nanocrystals. (2015). Edited by Gudrun Kissinger, Sergio Pizzini. *Taylor & Francis Group*, 431 p. doi:10.1201/b17868.
- [31] Kustov V. E., Kritskaya T. V., Tripachko N. A., Shakhovtsov V. I. (1988). Vliyanie germaniya na vnutrennie uprugie napryazheniya v kislorodosoderzhashchem kremnii [Influence of germanium on internal elastic stresses in oxygen-containing silicon]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov [Physics and Technics of Semiconductors]*, Vol. 2, Iss. 2, pp. 313-315.
- [32] Dielectric Isolation in Integrated Circuits. (2011). *Circuits Today*.
- [33] Sidorov D. V. (2013). *Primenenie radionuklidnykh istochnikov α -izlucheniya dlya imitacii nejtronnogo vozdejstviya na kremnievye bipolyarnye tranzistory [Application of radionuclide sources of α -radiation for simulation of the neutron action on silicon bipolar transistors]*. Avtoref. diss. kand. tekhnich. nauk. Spec.: 05.27.01 Tverdotel'naya elektronika, radioelektronnye komponenty, mikro- i nanoelektronika, pribory na kvantovykh effektah [Abstract diss. Cand. Techn. Sciences. Specialty: 05.27.01 Solid-state electronics, radio-electronic components, micro- and nanoelectronics, devices based on quantum effects]. M.: Scientific&Production Enterprise "Pulsar", 25 p.
- [34] *Izmeriteli harakteristik poluprovodnikovykh priborov L2-56, L2-56A*. TU 11-81.OMM2.756.00.1. Tekhnicheskoe opisanie i instrukciya po ekspluatacii [Indicators of characteristics of semiconductor devices L2-56, L2-56A. TU 11-81.OMM2.756.00.1. Technical description and instruction manual].
- [35] Tutorials for Origin. (2016). *OriginLab Corporation*.
- [36] *OriginLab*. Category: Origin Basic Functions, Growth/Sigmoidal, Statistics. 30.1.104 Logistic.
- [37] *OriginLab*. Category: Growth/Sigmoidal. 30.1.83 Hill1.
- [38] *OriginLab*. Category: Growth/Sigmoidal. 30.1.105 Logistic5.

Radiation Resistance of Test npn IC Transistors with Dielectric Insulation, Manufactured on Silicon, Isovalently Doped with Germanium (SiGe)

Bytkin S. V., Krytskaja T. V.

There is a contradictory assessment of the possibility of germanium (Ge) use to increase the radiation resistance of silicon (Si) homogeneously doped with an isovalent impurity. A number of publications show that only a limited effect of germanium doping on the radiation stability of the pn-structure, irradiated by high-energy electrons is observed. Simultaneously there is a noticeable improvement in the radiation resistance of npnp-structures made on SiGe under γ -irradiation. In order to remove the contradiction, this work compares the β radiation degradation of test bipolar transistor npn Integrated Circuit (IC) structures, manufactured using the same technology, "silicon with dielectric insulation", on isovalent germanium-doped SiGe silicon with different Ge content, $N_{Ge} = 1, 2 \cdot 10^{19} \dots 1, 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. The static gain coefficient β is measured before and after α -irradiation. Irradiation of unencased npn structures with α -particles with an energy of 4.5 MeV carried out in a specially designed and manufactured laboratory installation using radioisotope sources; npn structures with two base thicknesses: 0.25 and 0.35 μm are studied experimentally. The dependence approximating the experimental data, $\beta(\Phi_\alpha)$, an equation, describing the change in the gain factor of the transistor structure upon α -irradiation, obtained using the OriginPRO program. Obtained results for

structures with a base thickness of 0.25 μm show a strong nonlinear dependence of $\beta(\Phi_\alpha)$ equations on N_{Ge} . The degradation of the control transistors gain, manufactured according to the standard technology ($N_{Ge} = 0$) is described by the S-curve. Irradiation of npn structures formed on SiGe wafers with different levels of doping with an isovalent impurity leads to a complete change of the nature of the dependence. For $\Phi_\alpha \leq 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ the nature of the change in β is practically the same for structures made on wafers with $N_{Ge} = 0$ and $N_{Ge} = 2, 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, as well as for $N_{Ge} = 1, 2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and $N_{Ge} = 1, 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. When increasing $\Phi_\alpha \geq 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ there is an accelerated degradation of the gain factor of npn structures made on wafers with $N_{Ge} = 2, 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. This level of doping of silicon with germanium is not acceptable from the point of view of Si radiation resistance. At $\Phi_\alpha \leq 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ radiation stability of npn structures made on SiGe wafers with $N_{Ge} = 1, 2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ approximately two times lower than the same of control structures with $N_{Ge} = 0$. For transistors with a base thickness of 0.35 μm , no effect of changing the nature of the npn structures $\beta(\Phi_\alpha)$ degradation. Observed dependence, which confirms the possibility of slowing down the radiation degradation of the amplification factor value of the npn structures made on SiGe. Increase in radiation resistance by 2-3 times for test transistors, made on SiGe wafers, doped with $N_{Ge} = 7, 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, observed in a wide range of doses of α -irradiation, $10^{11} \leq \Phi_\alpha \leq 10^{14} \text{ cm}^{-2}$.

Keywords: increase of radiation resistance; npn structure; doping of silicon with germanium; doping level with isovalent impurity; degradation of the amplification factor