

УДК 53.09

ВЛИЯНИЕ ИЗОВАЛЕНТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ Si ГЕРМАНИЕМ НА ВЕРОЯТНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ПРИМЕСНО-ДЕФЕКТНЫХ КОМПЛЕКСОВ В БАЗЕ p^+n СТРУКТУР ПРИ ОБЛУЧЕНИИ α -ЧАСТИЦАМИ

С. В. Быткин¹, Т. В. Критская²

¹ПАО «Запорожсталь», ул. Южное шоссе, 72, 69008, Запорожье, Украина

²Запорожская государственная инженерная академия,
проспект Соборный, 226, 69006 Запорожье, Украина

E-mail: bytkin@birmir.net

Поступила в редакцию 17.05.2018

Проведен расчет вероятности образования А-, Е-, К-центров в CZ nSiGe с использованием ранее полученных эмпирических S-образных зависимостей накопления примесно-дефектных комплексов от интегрального потока α -частиц. Показано, что вероятность захвата вакансий атомами междоузельного кислорода в SiGe нелинейно зависит от дозы облучения, причем ее интегральное значение в диапазоне $\Phi_\alpha \approx 10^9 \dots 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ существенно ниже, чем в контрольных образцах nSi. Полученные результаты объясняются с использованием имеющихся в литературе моделей. Изменение вероятности дефектообразования хорошо коррелирует с данными по деградации времени жизни инжектированных неосновных носителей заряда в базе p^+n структуры.

Ключевые слова: накопление примесно-дефектных комплексов, поток α -частиц, вероятность образования А-, Е-, К-центров в CZ nSiGe, деградация времени жизни инжектированных неосновных носителей заряда.

EFFECT OF ISOVALENT DOPING OF Si BY GERMANIUM ON THE IMPURITY-DEFECT COMPLEXES FORMATION PROBABILITY IN THE p^+n STRUCTURES BASE IRRADIATED BY α -PARTICLES

Serhiy Bytkin¹, Tetiana Krytskaja²

¹PJSC «Zaporizhstal», 72 South Highway Str., 69008, Zaporizhia, Ukraine

²Zaporizhia State Engineering Academy, 226 Soborny Avenue, 69006 Zaporizhia, Ukraine

The probability of A-, E-, K-centers formation in CZ nSi and nSiGe using the previously obtained empirical S-shaped dependences of the accumulation of impurity-defect complexes on the integral flux of α -particles was calculated. Shown, that the probability of vacancy trapping by atoms of interstitial oxygen in SiGe depends nonlinearly on the irradiation dose, and its integral value in the range $\Phi_\alpha \approx 10^9 \dots 5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ was much lower than in control nSi samples. The results explained using models available in the literature. The change of the defect formation probability correlates well with the data on the lifetime degradation of the injected minority charge carriers in the base of the p^+n structure.

Key words: accumulation of impurity-defect complexes, flux of α -particles, probability of the A-, E-, K-centers in CZ nSiGe formation, degradation of the injected minority charge carriers lifetime.

ВПЛИВ ІЗОВАЛЕНТНОГО ЛЕГУВАННЯ Si ГЕРМАНІЄМ НА ЙМОВІРНІСТЬ УТВОРЕННЯ ДОМІШКОВО-ДЕФЕКТНИХ КОМПЛЕКСІВ У БАЗІ p^+n СТРУКТУР ПРИ ОПРОМІНЕННІ α -ЧАСТИНКАМИ

С. В. Биткін¹, Т. В. Критська²

¹ПАО «Запоріжсталь», вул. Південне шосе, 72, 69008, Запоріжжя, Україна

²Запоріжська державна інженерна академія,
проспект Соборний, 226, 69006 Запоріжжя, Україна

Проведено розрахунок ймовірності утворення А-, Е-, К-центрів в CZ nSi і nSiGe з використанням раніше отриманих емпіричних S-подібних залежностей накопичення домішково-дефектних комплексів від інтегрального потоку α -частинок. Встановлено, що ймовірність захоплення вакансій атомами міжвузлового кисню в SiGe не-

лінійно залежить від дози опромінення, причому її інтегральне значення в діапазоні $\Phi \approx 10^9 \dots 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ істотно нижче, ніж у контрольних зразках nSi. Отримані результати пояснюються застосуванням відомих у літературі моделей. Змінювання ймовірності утворення дефектів добре корелює з даними про деградацію часу життя інжектіваних неосновних носіїв заряду в базі p^+n структури.

Ключові слова: накопичення домішково-дефектних комплексів, потік α -частинок, ймовірність утворення А-, Е-, К-центрів в CZ nSiGe, деградація часу життя інжектіваних неосновних носіїв заряду.

ORCID IDs

Serhiy Bytkin: <https://orcid.org/0000-0003-3583-3371>

Tetiana Krytskaja: <http://orcid.org/0000-0001-6933-0460>

ВВЕДЕНИЕ

Создание полупроводниковых материалов для изготовления радиационно-стойких изделий электронной техники (ИЭТ) является частью глобальной проблемы разработки, изготовления и применения материалов, сохраняющих свои физические свойства в условиях действия ионизирующих излучений [1]. В основу такого подхода заложены «стратегии проектирования дефектов» (defect engineering strategies). Точечные электрически активные дефекты, создающие глубокие энергетические уровни в полупроводниках (примесно-дефектные комплексы и/или их кластеры) используются для управления физическими свойствами полупроводниковых материалов [2]. Электрически активный А-центр (VO) в Cz-Si является наиболее важным дефектом [3], связанным с междоузельным кислородом O_i (oxygen interstitials atoms) и вакансией V (дефект кристаллической решетки, образовавшийся в результате взаимодействия Si с частицами с высокой энергией, $\approx \text{МэВ}$), образующимся согласно квазихимической реакции $V + O_i \rightarrow VO$ в полях ионизирующих излучений вследствие генерации диффундирующих V. Из изначально возникших при облучении четырех оборванных связей вокруг вакансии, соответствующих четырем окружающим ее атомам Si, два соединяются «мостиком» – атомом кислорода, образуя квазимолекулу Si-O-Si. Два других атома Si формируют слабую молекулярную связь Si-Si. В этой структуре атом кислорода присоединен к оборванной связи между атомами кремния, формируя дефект типа VO. Эта связь имеет возможность захватить электрон и ответственна за электрическую активность дефекта, который создает акцепторный уровень $E_c = 0,17 \text{ эВ}$ в запрещенной зоне. Дефект форми-

руется при приближении мигрирующей вакансии к атому кислорода в междоузельном пространстве. Рекомбинационные свойства А-центров (эффективные ловушки для инжектированных неосновных носителей заряда в pnp , pnp структурах) существенно ухудшают рабочие характеристики облученных полупроводниковых устройств. Геометрическая конфигурация дефекта может рассматриваться практически как замещающий атом кислорода в решетке кремния, но в реальности атом кислорода удален от вакансии на $\sim 0,9 \text{ \AA}$ вдоль направления $\langle 100 \rangle$. Дефект активен в инфракрасной области спектра с полосой поглощения 830 см^{-1} в нейтральном зарядовом состоянии и 885 см^{-1} в отрицательном [4].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для подавления концентрации А-центров разрабатываются инженерные стратегии управления дефектообразованием в материале неоднородных активных структур микроэлектронных и дискретных устройств [5, 6]. В частности, предлагается использование изовалентных примесей (углерод (C), германий (Ge) и олово (Sn)) для управления процессом формирования комплексов VO в Si, хотя это и связано с изменением его структурных и физических свойств за счет различных ковалентных радиусов примесей и легируемой матрицы. Изовалентные примеси замещают атомы Si, но являются электрически неактивными. Углерод имеет наименьший ковалентный радиус $r_C = 0.77 \text{ \AA}$ по сравнению с Si ($r_{Si} = 1.17 \text{ \AA}$), ковалентный радиус Ge $r_{Ge} = 1.22 \text{ \AA}$. Для Sn и Pb $r_{Sn} = 1.41 \text{ \AA}$, $r_{Pb} = 1.44 \text{ \AA}$ соответственно, вследствие чего при их внедрении в решетку Si создается упругое напряжение (растяжения в случае C и сжатия для Ge, Sn и Pb). Влияние

изовалентного легирования на основные электрофизические свойства кремния в этих работах обобщается следующим образом.

1. Введение указанных примесей в кристаллическую решетку не влияет на концентрацию носителей в Si, но их присутствие может изменять подвижность носителей. Вследствие создаваемых полей напряжений изовалентные примеси влияют на равновесную концентрацию собственных дефектов, как вакансий, так и междоузельных атомов.

2. Изовалентные примеси взаимодействуют или с вакансиями, или с собственными междоузельными атомами в зависимости от того, больше или меньше величина их ковалентного радиуса по сравнению с атомом принимающей матрицы. В первом случае (Ge, Sn, Pb), изовалентная примесь действует как эффективный сток для вакансий, во втором случае (C) – как сток для собственных междоузельных атомов. Захват вакансий примесями с ковалентным радиусом, большим, чем у Si, может приводить к замедлению или подавлению формирования стабильных радиационных дефектов, в состав которых входят вакансии, в частности, активного рекомбинационного центра VO, отрицательно влияющего на радиационную стойкость кремния (комплекс V-O и дивакансия V2 создают глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне кремния, являющиеся рекомбинационными центрами).

3. Изовалентные примеси влияют на механизмы диффузии и агрегирования (кластеризации, преципитации) O_i , существенно влияя на формирование термодоноров. Наблюдается выраженное влияние изовалентных примесей на механические свойства Si, в том числе на концентрацию микродефектов.

4. Изовалентные примеси создают возможности для управления шириной запрещенной зоны кремния (band-gap engineering), что рассматривается как ключевая особенность кремниевой технологии (a key point in Si-based technology).

Взаимодействие изовалентных примесей, (Sn, Pb, Ge), обозначаемых D, с A-центрами приводит к формированию комплексов DVO по реакции $D + VO \rightarrow DVO$, стабильность

которых выше по сравнению с дефектами вида VO. Комплексы SnVO существенно более устойчивы, чем GeVO и CVO. Установлено, что Sn не образует связей с O_i , подавляет образование центров типа VO и V2 в облученном Si и легирование этой примесью могло бы рассматриваться как путь улучшения радиационной стойкости ИЭТ, но, помимо снижения эффективности образования A-центров, дивакансий и E-центров, комплекс Sn-V создает глубокие энергетические уровни (рекомбинационные центры) в запрещенной зоне кремния, т. е., фактически, один вид радиационных дефектов дополняется двумя другими [7, 8], (рис. 1).

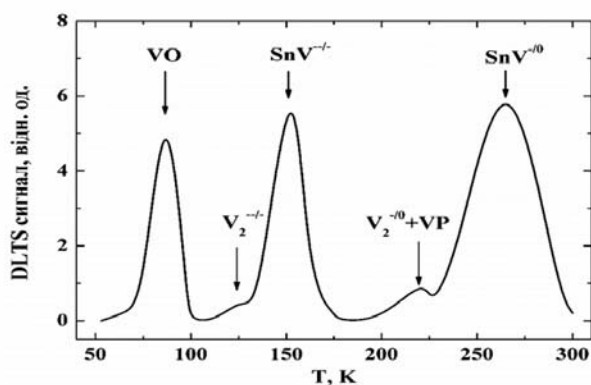


Рис. 1. Спектр DLTS для облученного 1 MeV электронами n-Si<Sn>, $\Phi_e = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Комплекс SnV имеет глубокие уровни с энергиями $E_c - 0,214 \text{ эВ}$ для SnV и $E_c - 0,501 \text{ эВ}$ для SnV – 0. С технологической точки зрения легирование кремния Sn практически эквивалентно введению в кремний Au.

Облучение n-Si<Sn> электронами с энергией 1 MeV приводит к ускоренному уменьшению концентрации основных носителей заряда, рис.2:

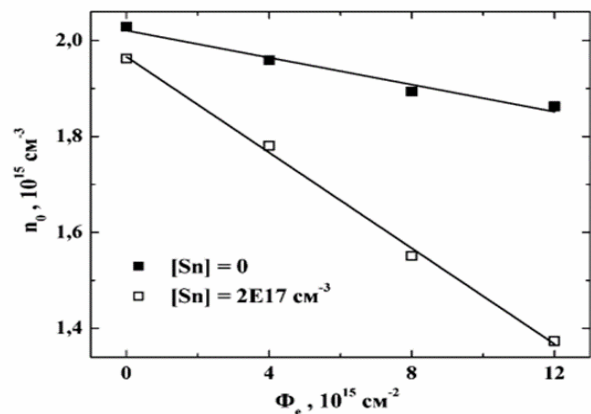


Рис. 2. Сравнение скоростей деградации концентрации основных носителей заряда в n-Si<Sn> при облучении электронами с энергией 1 MeV

Экспериментальное значение константы деградации концентрации основных носителей

$$k_n = \frac{\Delta n}{\Phi_e}$$

для n-Si<Sn> примерно в 5 раз выше,

чем для контрольных образцов. Особенности накопления радиационных дефектов в n-Si<Sn> полностью объясняет ускоренную деградацию времени жизни неравновесных носителей заряда в этом материале при облучении [9], рис.3:

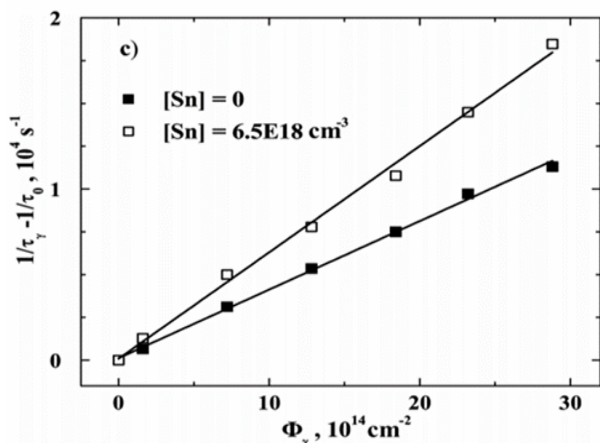


Рис. 3. Ускоренная деградация времени жизни неравновесных носителей заряда при γ -облучении (60Co), $\tau(\Phi_\gamma)$, в n-Si<Sn>

Следовательно, непосредственное применение n-Si<Sn> как материала для изготовления твердотельных ИЭТ, предназначенных для работы в полях ионизирующих излучений, не представляется возможным.

Свинец в кремнии образует скопления атомов с размером ≈ 10 мкм [10], что исключает применение этого материала для производства стандартных прп-структур с шириной базы $\leq 0,02$ мкм и, скорее всего, высоковольтных прп-структур вследствие закорачивания активных слоев. Вместе с тем, отмечается двукратное увеличение времени жизни неравновесных носителей заряда за счет очистки Si от Fe и Cu. Авторы этой работы указывают на возможность коррелированного распределения С и Pb (с которым связывается уменьшение в 5 - 7 раз концентрации оптически активного углерода), физической причиной которого является энергетически выгодное уменьшение внутренних механических напряжений в Si за счет взаимной

компенсации деформации растяжения и сжатия примесями со значительно отличающимися радиусами. Видимо, этим объясняется подавление пика Ес-0,37 эВ (К-центр) при облучении Si электронами с энергией 1 МэВ [11]. Присутствие Pb в кремнии не подавляет образование глубоких акцепторов, в состав которых входят вакансии, из чего авторами [12] делается вывод о неэффективности применения этой примеси для повышения радиационной стойкости Si. С точки зрения оценки возможности практического применения изовалентного легирования для уменьшения концентрации комплексов вакансия-кислород, расчет примесно-дефектного взаимодействия может проводиться с применением закона действующих масс (massaction analysis) [13]. Концентрация кластера дефектов XY (обозначается как [XY]) с энергией связи E_b относительно концентрации несвязанных дефектов X и Y (т. е. [X] и [Y] соответственно) определяется следующим образом:

$$\frac{[XY]}{[X][Y]} = \exp\left(\frac{-E_b}{k_b T}\right),$$

где k_b постоянная Больцмана, T – температура.

Энергия связи E_b определяется как

$$E_b = E_{\text{defectcluster}} - \sum E_{\text{isolateddefects}}.$$

Отрицательная энергия связи дефектов в кластере энергетически более выгодна (энергия дефектов в кластере меньше, чем в изолированном состоянии). Для данных, приведенных в цитируемой работе, прослеживается определенная закономерность: при E_b комплекса DV, $\approx 0,5$ от этой величины для комплекса DVO, преимущественно образуются комплексы примесь-вакансия, являющиеся рекомбинационными центрами, что делает такие комплексы неэффективными с точки зрения повышения радиационной стойкости Si (табл. 1):

Различия в энергии связи примесно-дефектных комплексов изовалентных примесей в Si

Тип комплекса	Энергия связи, E_b , эВ	Отношение энергий связи DV/DVO	Примечание
GeV	-0,26	0,107	Комплекс GeV при 300 °К не образуется, возможно образование комплекса GeVO
GeVO	-2,44		
SnV	-1,50	0,470	Комплекс SnV является эффективным рекомбинационным центром, снижающим радиационную стойкость Si
SnVO	-3,19		
PbV	-1,8	0,519	Комплекс PbV, хотя его существование экспериментально не подтверждено, предполагается устойчивым до 280 °С (SnV диссоциирует при 170 °С) [14, 15]
PbVO	-3,47		

Целью настоящей работы является оценка эффективности влияния Ge на вероятность образования радиационных дефектов с точки зрения образования комплекса GeVO.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО- РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ПРИМЕСНО-ДЕФЕКТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Логично предположение, что примесь, преимущественно образующая комплекс DVO, может быть использована для предотвращения рекомбинации инжектированных неравновесных неосновных носителей заряда в приборных структурах. Признаком этого будет являться наблюдаемое истощение эффективности этой примеси при увеличении дозы облучения, генерирующего вакансии. Вследствие наличия слабых полей напряжений на «периферии» области вокруг атомов D, она заполняется вакансиями [16], взаимодействующими с изовалентной примесью, V и O_i . Для объективной оценки влияния легирующих и фоновых элементов в монокристалле требуется получить численное значение вероятности образования примесно-дефектных комплексов, то есть фактически оценить эффективность влияния конкретной примеси на радиационное дефектообразова-

ние. Другими словами, необходим расчет вероятности образования основных радиационных дефектов в кремнии, легированном германием, и сравнение полученных численных значений с такими же характеристиками в контрольном кремнии.

Применим предложенную в [17, 18] методику расчета вероятности образования дефектов к ранее полученным экспериментальным данным [19]. Особенностью расчета, использованного авторами, являлся учет уменьшения концентрации фоновых примесей, межзельного кислорода O_i и углерода C_i при образовании A-, K- центров. Кроме того, в предыдущих работах не учитывался нелинейный, S-образный характер накопления A- и E-центров в изовалентно легированном германием кремнии. Использованный метод определения вероятностей накопления радиационных дефектов может быть применен для оценки влияния легирования кремния любой примесью, которая потенциально рассматривается как повышающая его радиационную стойкость.

Основные этапы расчета сводятся к следующему. Выбирается система уравнений, описывающая накопление радиационных дефектов, например, предложенная в [20]. Учитывая нелинейное накопление радиационных дефектов, уменьшение концентрации фоновых примесей (междузельный кислород, углерод) и фосфора из-за образования

А-, К-, Е- центров, дивакансий систему можно представить в следующем виде:

$$\frac{d}{dt}N_A = N'_A = P_{VO_i}(t) \cdot N_{O_i}(t) \cdot N_V(t),$$

$$N'_E = P_{VP}(t) \cdot N_P(t) \cdot N_V(t),$$

$$N'_K = P_{C_iO_iVV}(t) \cdot N_{C_i}(t) \cdot N_{O_i}(t) \cdot N_V(t) \times \left(N_V(t) - N_A(t) - N_E - \sum_{i=1}^n N_{VV}(t) - N_{VO^2} \right),$$

$$N'_{VV} = P_{VV}(t) \cdot N_V^2(t),$$

$$N_V(t) = \lambda_V \cdot \varphi \cdot t - N_A(t) \cdot N_E(t) \cdot \sum_{i=1}^n N_{VV}(t) - N_{VO^2}.$$

где P_{ij} – вероятность захвата вакансии (междоузельного атома) различными примесными

атомами; $\frac{d}{dt}(N_A, N_E, N_K, N_{VV})$ – скорости образования А-, Е-, К-центров, дивакансий в различных зарядовых состояниях; N_V – концентрация вакансий, генерируемых потоком альфа-частиц; λ_V – количество вакансий, создаваемых одной высокоэнергетической частицей; $t \leq 10^6$ с – время облучения тестовой структуры, φ – плотность потока излучения, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; $\sum_{n=1}^n N_{VV}(t)$, N_{VO^2} – суммарная кон-

центрация n типов дивакансий с различными зарядовыми состояниями ($E_C - 0,22$ эВ, $E_C - 0,32$ эВ) и других содержащих вакансии дефектов ($E_V + 0,2$ эВ – дефект типа VO_2); Согласно [21], λ_v – это отношение количества дефектов, содержащих вакансии (с учетом количества вакансий в различных видах дефектов), к интегральному потоку альфа-частиц $\Phi_\alpha(t) = \varphi t$. Например, для их нелинейного накопления формула в используемом для сравнения nSi имеет вид:

$$\lambda_V = \frac{\int_{\Phi_{\alpha \min}}^{\Phi_{\alpha \max}} \left(N'_{AS_i}(t) + N'_{ES_i}(t) + 2 \cdot \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^n N_{VV}(t) \right) + N'_{VO^2}(t) \right) dt}{\Phi_\alpha(t_{\max})}.$$

Определение вероятности образования единичного радиационного дефекта P_{ij} проводится численным методом, поскольку аналитическое решение возможно только с использованием квазистационарного приближения [22]. Например, для А-центра:

$$P_{VO'} = \frac{N'_A}{N_{O_i}(t) \cdot N_V(t)}.$$

Аналогично проводится расчет P_{ij} для других дефектов. Подставляя эмпирические уравнения, описывающие накопление и вероятность образования А- и К-центров в Si<P> и Si<P, Ge> в физические, описывающие накопление дефектов, получаем выражения для P_{ij} в виде, удобном для решения в MathCAD, без записи всех уравнений в явном виде.

4. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов приведены на рис. 4. Полученные зависимости качественно могут быть объяснены простой схемой [23]. При облучении Si<P, Ge> образуется устойчивый кластер GeVO, уменьшающий концентрацию вакансий в облучаемом материале и, как следствие, концентрацию радиационных дефектов на начальном этапе облучения. Эффективность процесса формирования стока для вакансий достигается за счет коррелированного распределения германия и кислорода, приводящего к более полной компенсации внутренних упругих напряжений в кремнии [24]. Сток вакансий, образующих кластер, при $\Phi_\alpha \leq 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ уменьшает вероятность образования А- и Е-центров в Si<P, Ge> по сравнению с контрольным Si. После насыщения комплекса Ge-О вакансиями ак-

тивизируется процесс образования А-центров, достигая максимума при $\Phi_\alpha \approx 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Фактически, увеличение вероятности образования А-центров связано с взаимодействием междоузельного кислорода, окружающего атомы Ge, с вводимыми в материал облучением вакансиями. После исчерпания в ходе квазихимической реакции O_i вероятность образования комплексов V-O в

изовалентно легированном Si существенно ниже, чем в контрольном материале. Вероятность образования К-центров практически одинакова в исследуем и контрольном материале и существенно ниже, чем для А-центров, определяющих радиационную стойкость материала.

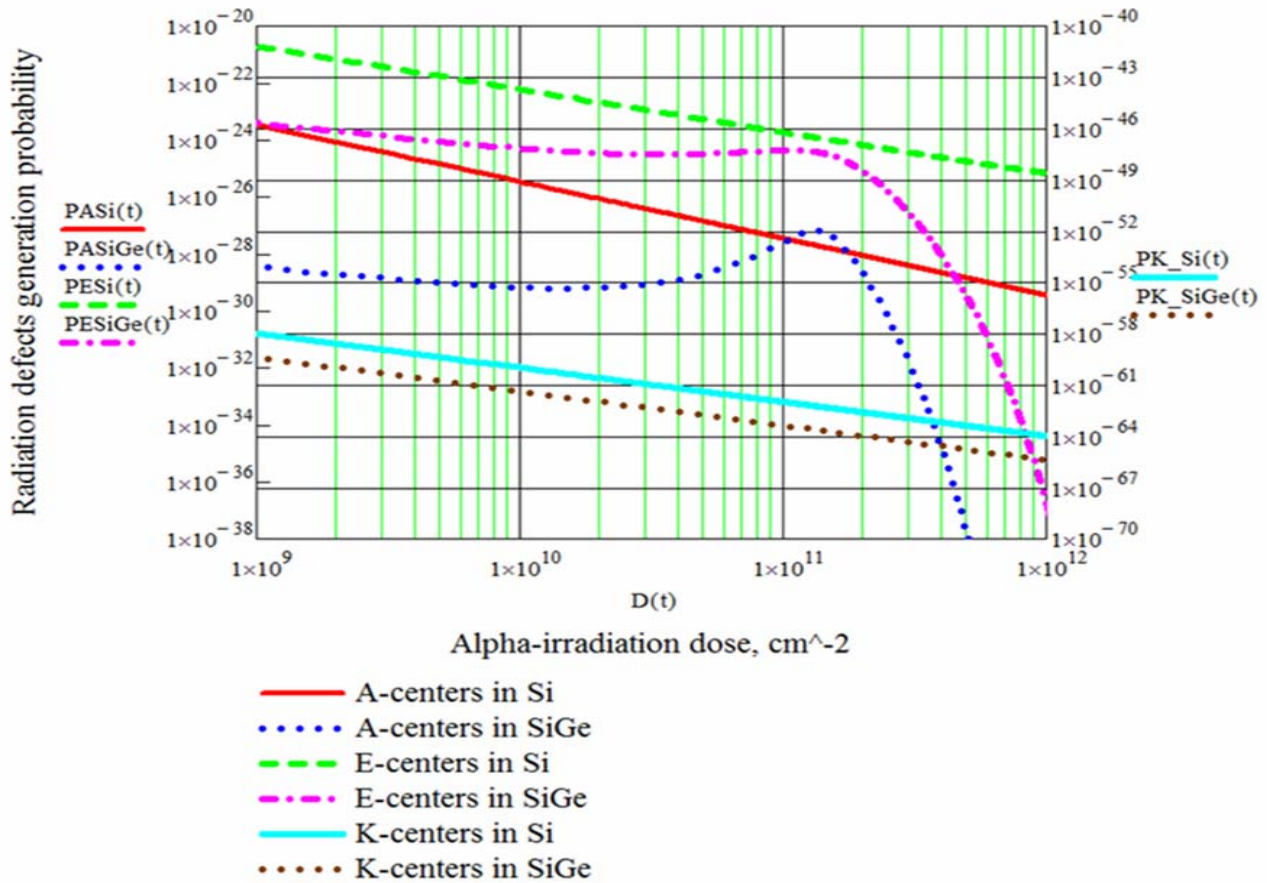


Рис. 4. Вероятность образования единичного радиационного дефекта в Si, SiGe

Интегральная вероятность образования А-центров в контрольном nSi (в определенном интервале доз облучения) существенно выше, чем в nSiGe (листинг 1):

$\frac{\int_{10^9}^{1 \cdot 10^{10}} \frac{d}{dt} \text{PASi}(t) dt}{\int_{10^9}^{1 \cdot 10^{10}} \frac{d}{dt} \text{PASiGe}(t) dt} = 1.128 \times 10^5$	$\frac{\int_{10^9}^{5 \cdot 10^{11}} \frac{d}{dt} \text{PASi}(t) dt}{\int_{10^9}^{5 \cdot 10^{11}} \frac{d}{dt} \text{PASiGe}(t) dt} = 8.735 \times 10^4$	$\frac{\int_{10^9}^{10^{12}} \frac{d}{dt} \text{PASi}(t) dt}{\int_{10^9}^{10^{12}} \frac{d}{dt} \text{PASiGe}(t) dt} = 3.456 \times 10^4$	$\frac{\int_{10^9}^{10^{13}} \frac{d}{dt} \text{PASi}(t) dt}{\int_{10^9}^{10^{13}} \frac{d}{dt} \text{PASiGe}(t) dt} = 142.742$
---	---	---	---

Листинг 1. Относительное превышение количества А-центров в контрольном nSi по сравнению с изовалентно легированным Ge кремнии (расчет в MathCAD)

Эффективность применения изовалентного легирования для снижения вероятности образования E-центров существенно ниже, $\approx 5 \cdot 10^2$. Полученные результаты хорошо согла-

суются с деградацией времени жизни инжектированных неосновных носителей заряда ($\tau_{\text{HHЗ}}$) в базе p⁺n структуры [25], рис. 5:

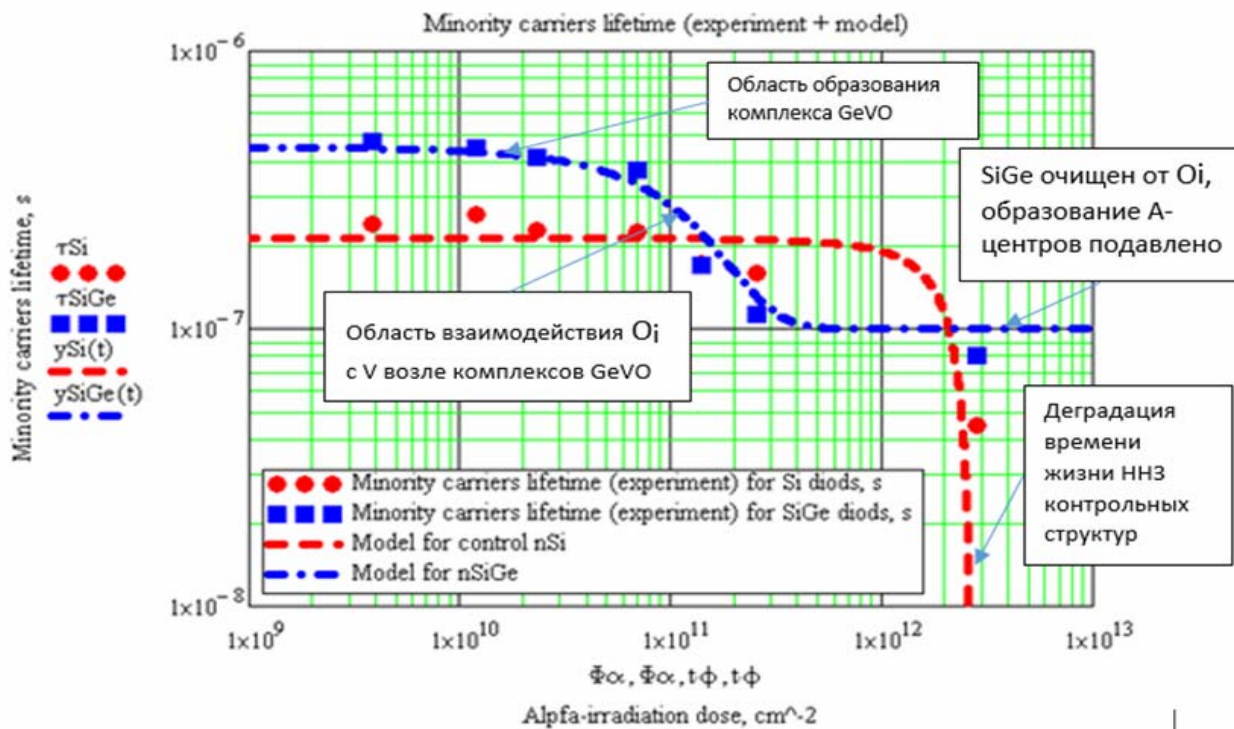


Рис. 5. Области изменения экспериментальных значений $\tau_{\text{HHЗ}}$, соответствующие вероятностям процессов образования радиационных дефектов.

5. ВЫВОДЫ

1. Легирование Si германием существенно уменьшает вероятность радиационного дефектообразования в диапазоне $\Phi_\alpha \approx 10^9 \dots 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, нелинейный характер изменения которой связан, видимо, с истощением концентрации Ge вследствие образования комплекса GeVO.

2. При $\Phi_\alpha \geq 10^{12} \text{ см}^{-2}$ радиационная деградация $\tau_{\text{HHЗ}}$ в nSiGe существенно замедляется по сравнению с контрольным nSi, что позволяют предполагать возможность эффективного использования изовалентно легированного германием кремния для повышения радиационной стойкости многослойных структур ИЭТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sgourou E. N., Panayiotatos Y., Vovk R. V., Chroneos A. Toward Defect Engineering Strate-

gies to Optimize Energy and Electronic Materials // Appl. Sci. – 2017. – No. 7. – P. 674.
 2. Alkauskas A., McCluskey M. D., Van de Walle C. G.. Tutorial: Defects in semiconductors—Combining experiment and theory // Journal of Applied Physics. – 2016. – Vol. 119, is. 18. – P. 181101.
 3. Chroneos A., Sgourou E. N., Lontos C. A., Schwingenschlögl U. Oxygen defect processes in silicon and silicon germanium // Applied Physics Reviews. – 2015. Vol. 2, is. 2. – P. 021306.
 4. Weiser P. M. Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy (lecture). Center for Materials Science and Nanotechnology. University of Oslo. – 2017.
 5. Chroneos A., Lontos C. A., Sgourou E. N., Pochet P. Point defect engineering strategies to suppress A-center formation in silicon // Appl. Phys. Lett. – 2011. – Vol. 99. – P. 241901.
 6. Lontos C. A., Sgourou E. N., Hall D., Chroneos A. Vacancy-oxygen defects in silicon: the impact

- of isovalent doping // *J. Mater. Sci.: Mater Electron.* – 2014. Vol. 25. – P. 2395-2410.
7. Larsen A. N., Goubet J. J., Mejlholm P. et al. Tin-vacancy acceptor levels in electron-irradiated n-type silicon // *Physical Review B Condensed Matter.* – 2000. – Vol. 62(7). P. 4535-4544.
 8. Красько М. М. Вплив домішки олова на деградацію провідності в n-кремнії при електронному опроміненні // *Укр. фіз. журн.* – 2013. Т. 58, № 3. – С. 245-250.
 9. Kras'ko M. M. Influence of tin impurity on recombination characteristics in γ -irradiated n-Si // *Ukr. J. Phys.* – 2012. – Vol. 57, No. 11. – P. 1162-1168.
 10. Neimash V. B., Voitovych V. V., Kraitchinskii A. M., Shpinar L. I., Kras'ko M. M., Popov V. M., Pokanevych A. P., Gorodys'kyi M. I., Pavlovs'kyi Yu. V., Tsmots' V. M., Kabaldin O. M. Influence of doping by the isovalent lead impurity on the parameters of n-silicon // *Ukr. J. Phys.* – 2005. – Vol. 50, No. 5. – P. 492-496.
 11. David M. L., Simoen E., Claeys C., Neimash V., Kras'ko M., Kraitchinskii A., Voytovych V., Kabaldin A., Barbot J. F. On the effect of lead on irradiation induced defects in Silicon // *Solid State Phenomena.* – 2005. – Vol. 108-109. – P 373-378.
 12. David M.-L., Simoen E., Claeys C., Neimash V., Kras'ko M., Kraitchinski A., Voytovuch V., Tishcenko V., Barbot J. F. Radiation-Induced Deep Levels in Lead- and Tin-Doped n-Type Czochralski Silicon. High Purity Silicon VIII. Proceedings of the International Symposium. Editors C. L. Claeys, M. Watanabe, R. Falster, P. Stallhofer. Proceedings Volume 2004-05. THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, INC. 65 South Main St., Pennington, NJ 08534-2839, USA
 13. Christopoulos S-R. G., Parfitt D., Sgourou E. N., Londos C. A., Vovk R. V., Chroneos A. Controlling A-center concentration in silicon through isovalent doping: Mass action analysis // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics.* – 2016. Vol. 27 (5). – P. 4385-4391.
 14. Londos C. A., Sgourou E. N., Chroneos A. Defect engineering of the oxygen-vacancy clusters formation in electron irradiated silicon by isovalent doping: An infrared perspective // *J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol 112. – P. 123517.
 15. Londos C. A., Aliprantis D., Sgourou E. N., Chroneos A., Pochet P. Formation and evolution of oxygen-vacancy clusters in lead and tin doped silicon // *Journal of Applied Physics.* – 2012. Vol. 111. – P. 123508.
 16. Londos C. A., Angeletos T., Sgourou E. N., Chroneos A. Engineering VO, CiOi and CiCs defects in irradiated Si through Ge and Pb doping // *J. Mater. Sci.: Mater Electron.* – 2015. Vol. 26. – P. 2248–2256.
 17. Bytkin S. V., Kritskaya T. V. Comparative analysis of the radiation defects accumulation in n-Si and n-SiGe, used for the discrete thyristors manufacturing on the initial stage of irradiation, using estimation of the probability of A-, E-, K-centers formation. // 25th International Conference on Defects in Semiconductors, St. Petersburg, Russia, July 20-24, 2009 Book of Abstracts. - P. 193-194.
 18. Быткін С. В., Критська Т.В. Моделирование процесса накопления радиационных дефектов в процессе облучения монокристаллов Si <P> и Si <P, Ge>. *Металургія. Збірник наукових праць Запорізької державної інженерної академії*, вип. 1(21). Запоріжжя, 2010. – С. 116-125.
 19. Быткін С. В., Критская Т. В. Моделирование S-образного процесса накопления A- и E-центров в изовалентно легированном германием кремнии в среде Statistica и MathCAD. «Сучасні проблеми металургії», № 21, випуск 1- 2018. – С. 29-35
 20. Хируненко Л. И., Шаховцов В.И., Шинкаренко В.К. и др. Особенности процессов радиационного дефектообразования в кристаллах Si<Ge> // *ФТП.* – 1987. – Т. 21, вып. 3. – С. 562-565.
 21. Винецкий В. Л. О кинетике образования вторичных радиационных дефектов в полупроводниках // *ФТП.* – 1968. – Т. 2, вып. 8. – С. 1074-1082.
 22. *Радіаційна фізика: підручник / Л. А. Булавін, О. П. Дмитренко, М. П. Куліш.* – К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2010. – 551 с.
 23. Londos C. A., Sgourou E. N., Chroneos A., Emtsev V. V. Carbon, oxygen and intrinsic defect interactions in germanium-doped silicon // *Semicond. Sci. Technol.* – 2011. Vol. 26. – P. 105024 (7 pp).
 24. Критская Т. В. Современные тенденции получения кремния для устройств электроники: монография // *Запорож. гос. инженер. акад.* – Запорожье: ЗГИА, 2013. – 353 с.
 25. Критская Т. В., Быткін С. В. Радиационная деградация времени жизни неосновных носителей заряда в кремниевых p^+n -структурах. *Металургія. Збірник наукових праць Запорізької державної інженерної академії*, вип. 1(26). Запоріжжя, ЗДІА, 2012. – С. 110-116.

REFERENCES

1. Sgourou E. N., Panayiotatos Y., Vovk R. V., Chroneos A. Toward Defect Engineering Strategies to Optimize Energy and Electronic Materials // *Appl. Sci.* – 2017. – No. 7. – P. 674.
2. Alkauskas A., McCluskey M. D., Van de Walle C. G.. Tutorial: Defects in semiconductors—Combining experiment and theory // *Journal of Applied Physics.* – 2016. – Vol. 119, is. 18. – P. 181101.
3. Chroneos A., Sgourou E. N., Londos C. A., Schwingenschlögl U. Oxygen defect processes in silicon and silicon germanium // *Applied Physics Reviews.* – 2015. Vol. 2, is. 2. – P. 021306.
4. Weiser P. M. Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy (lecture). Center for Materials Science and Nanotechnology. University of Oslo. – 2017.
5. Chroneos A., Londos C. A., Sgourou E. N., Pochet P. Point defect engineering strategies to suppress A-center formation in silicon // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – Vol. 99. – P. 241901.
6. Londos C. A., Sgourou E. N., Hall D., Chroneos A. Vacancy-oxygen defects in silicon: the impact of isovalent doping // *J. Mater. Sci.: Mater Electron.* – 2014. Vol. 25. – P. 2395-2410.
7. Larsen A. N., Goubet J. J., Mejlholm P. et al. Tin-vacancy acceptor levels in electron-irradiated n-type silicon // *Physical Review B Condensed Matter.* – 2000. – Vol. 62(7). P. 4535-4544.
8. Krasko M. M. Vplyv domishkiv olova na degratsiyu providnosti v n-kremnii pry elektronnomu oprominenni // *Ukr. fiz. zhurn.* – 2013. Vol. 58, No. 3. – P. 245-250.
9. Kras'ko M. M. Influence of tin impurity on recombination characteristics in γ -irradiated n-Si // *Ukr. J. Phys.* – 2012. – Vol. 57, No. 11. – P. 1162-1168.
10. Neimash V. B., Voitovych V. V., Kraitchinskii A. M., Shpinar L. I., Kras'ko M. M., Popov V. M., Pokanevych A. P., Gorodys'kyi M. I., Pavlovs'kyi Yu. V., Tsmots' V. M., Kabaldin O. M. Influence of doping by the isovalent lead impurity on the parameters of n-silicon // *Ukr. J. Phys.* – 2005. – Vol. 50, No. 5. – P. 492-496.
11. David M. L., Simoen E., Claeys C., Neimash V., Kras'ko M., Kraitchinskii A., Voytovych V., Kabaldin A., Barbot J. F. On the effect of lead on irradiation induced defects in Silicon // *Solid State Phenomena.* – 2005. – Vol. 108-109. – P 373-378.
12. David M.-L., Simoen E., Claeys C., Neimash V., Kras'ko M., Kraitchinski A., Voytovuch V., Tishchenko V., Barbot J. F. Radiation-Induced Deep Levels in Lead- and Tin-Doped n-Type Czochralski Silicon. High Purity Silicon VIII. Proceedings of the International Symposium. Editors C. L. Claeys, M. Watanabe, R. Falster, P. Stallhofer. Proceedings Volume 2004-05. THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, INC. 65 South Main St., Pennington, NJ 08534-2839, USA
13. Christopoulos S-R. G., Parfitt D., Sgourou E. N., Londos C. A., Vovk R. V., Chroneos A. Controlling A-center concentration in silicon through isovalent doping: Mass action analysis // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics.* – 2016. Vol. 27 (5). – P. 4385-4391.
14. Londos C. A., Sgourou E. N., Chroneos A. Defect engineering of the oxygen-vacancy clusters formation in electron irradiated silicon by isovalent doping: An infrared perspective // *J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol 112. – P. 123517.
15. Londos C. A., Aliprantis D., Sgourou E. N., Chroneos A., Pochet P. Formation and evolution of oxygen-vacancy clusters in lead and tin doped silicon // *Journal of Applied Physics.* – 2012. Vol. 111. – P. 123508.
16. Londos C. A., Angeletos T., Sgourou E. N., Chroneos A. Engineering VO, CiOi and CiCs defects in irradiated Si through Ge and Pb doping // *J. Mater. Sci.: Mater Electron.* – 2015. Vol. 26. – P. 2248–2256.
17. Bytkin S. V., Kritskaya T. V. Comparative analysis of the radiation defects accumulation in n-Si and n-SiGe, used for the discrete thyristors manufacturing on the initial stage of irradiation, using estimation of the probability of A-, E-, K-centers formation. // 25th International Conference on Defects in Semiconductors, St. Petersburg, Russia, July 20-24, 2009 Book of Abstracts. - P. 193-194.
18. Byitkin S. V., Kritskaya T.V. Modelirovanie protsessa nakopleniya radiatsionnykh defektov v protsesse oblucheniya monokristallov Si <P> i Si <P, Ge> // *Metalurgiya. Zbirnyk naukovykh prats Zaporizhskoi derzhavnii inzhenernoi akademii*, vyp. 1(21). Zaporizhzhia, 2010. – P. 116-125.
19. Byitkin S. V., Kritskaya T. V. Modelirovanie S-obraznogo protsessa nakopleniya A- i E-tsentrov v izovalentno legirovannom germaniem kremnii v srede Statistica i MathCAD // «Suchasni problemy metalurgii». – 2018, No. 21, vypusk 1. – P. 29-35.
20. Hirunen L. I., Shahovtsov V.I., Shinkarenko V.K. i dr. Osobennosti protsessov radiatsionnogo defektoobrazovaniya v kristallah Si<Ge> // *FTP.* – 1987. – Vol. 21, vyp. 3. – P. 562-565.
21. Vinetskiy V. L. O kinetike obrazovaniya vtorichnykh radiatsionnykh defektov v polupro-

- vodnikah // FTP. – 1968. – Vol. 2, vyp. 8. – P. 1074-1082.
22. Radiatsiyana fizika: pidruchnyk / L. A. BulavIn, O. P. Dmitrenko, M. P. Kullsh. – K.: Vydavnycho-poligrafichniy tsentr «Kyivskiy universytet», 2010. – 551 p.
23. Londos C. A., Sgourou E. N., Chronos A., Emtsev V. V. Carbon, oxygen and intrinsic defect interactions in germanium-doped silicon // Semicond. Sci. Technol. – 2011. Vol. 26. – P. 105024 (7 pp).
24. Kritskaya T. V. Sovremennyye tendentsii polucheniya kremniya dlya ustroystv elektroniki: monografiya // Zaporozh. gos. inzhener. akad. – Zaporozhie: ZGIA, 2013. – 353 s.
25. Kritskaya T. V., Byitkin S. V. Radiatsionnaya degradatsiya vremeni zhizni neosnovnyih nositeley zaryada v kremnievyyh p⁺-n-strukturah. Metalurgiya. Zbirnyk naukovyyh prats Zaporizhkoï derzhavnoi inzhenernoi akademii, vyp. 1(26). Zaporizhzhya, ZDIA, 2012. – P. 110-116.