

Т.В. Критская ⁽¹⁾, профессор, д.т.н.

С.В. Быткин ⁽²⁾, начальник лаборатории, к.т.н.

РАДИАЦИОННАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В КРЕМНИЕВЫХ p^+n СТРУКТУРАХ

⁽¹⁾ Запорожская государственная инженерная академия,

⁽²⁾ ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь»

Проблема забезпечення радіаційної стійкості є принципово важливою не тільки для дискретних компонентів систем енергопостачання бортових систем супутників зв'язку, але й під час експлуатації високовольтних перетворювачів наземної залізничної техніки. Експериментальним і розрахунковим методами показано, що викорис-тання монокристалів кремнію, вирощених за методом Чохральського, легованих германієм, забезпечує стабілізацію часу життя неосновних носіїв у p^+n -структурах за великих доз опромінення. Одержані результати свідчать про можливість застосування CZ-Si<P,Ge> для створення приладів з підвищеною радіаційною стійкістю.

Проблема обеспечения радиационной стойкости является принципиально важной не только для дискретных компонентов систем энергоснабжения бортовых систем спутников связи, но и при эксплуатации высоковольтных преобразователей наземной железнодорожной техники. Экспериментальным и расчетным методами показано, что использование монокристаллов кремния, выращенных по методу Чох-ральского, легированных германием, обеспечивает стабилизацию времени жизни неосновных носителей в p^+n структурах при больших дозах облучения. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения CZ-Si<P,Ge> для создания приборов с повышенной радиационной стойкостью.

Введение. Одной из основных задач народнохозяйственного энергосбережения является совершенствование электропривода, на долю которого приходится примерно 60 % потребляемой в мире электроэнергии. На генерацию теплоты и технологические процессы затрачивается примерно 26 % потребляемой электроэнергии и около 5 % используется для освещения.

Стало очевидным, что прямой привод (двигатель-механизм) и регулируемый привод на двигателях постоянного тока утратили свою актуальность [1]. Практически повсеместно происходит вытеснение электропривода постоянного тока (его доля в настоящее время составляет ~7 % от всех эксплуатируемых регулируемых электро-приводов) асинхронными двигателями с преобразователями частоты. Принципиальными преимуществами обладает тяговый привод переменного тока для железнодорожного транспорта [2]: это меньшие масса, объем, потери в преобразователях, боль-шие устойчивость к механической, электрической и тепловой перегрузкам, надежность электрических схем и соответственно более низкая стоимость преобразователей. В современных схемах преобразователей напряжения широко используются запираемые тиристоры (GTO), не требующие коммутирующих цепей, так как их можно запирают подачей сигнала на управляющий электрод. Разработаны преобразователи на транзисторах IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором, который соединяет в себе присущие транзисторам оптимальные возможности переключения и, сравнимые с GTO, характеристики в открытом состоянии), специально предназначенные для тяговых приводов железнодорожного транспорта. Благодаря

хорошей управляемости транзисторов *IGBT* и отсутствию вспомогательных цепей *IGBT* во многом оказываются более эффективными по сравнению с *GTO* [3].

© Критская Т.В., Быткин С.В., 2012

Вместе с тем стала очевидной проблема работы силовых полупроводниковых приборов при высоких постоянных напряжениях, связанная с их внезапными непредсказуемыми отказами. Находящиеся под напряжением СПП (диоды, тиристоры или *IGBT*), не подвергающиеся перегрузке, отказывают мгновенно, без какой-либо предварительной деградации параметров. Несмотря на контроль рабочих процессов с помощью дорогостоящего измерительного оборудования, не удалось найти корреляции частоты отказов с какими-либо эксплуатационными режимами.

Анализ достижений. В начале 90-х годов прошлого столетия был обнаружен новый источник повреждения мощных высоковольтных полупроводниковых элементов всех видов (диодов, *GTO*, *IGCT*, *IGBT*) – космическая радиация [4], которая служит причиной достаточно большого количества их отказов при эксплуатации оборудования.

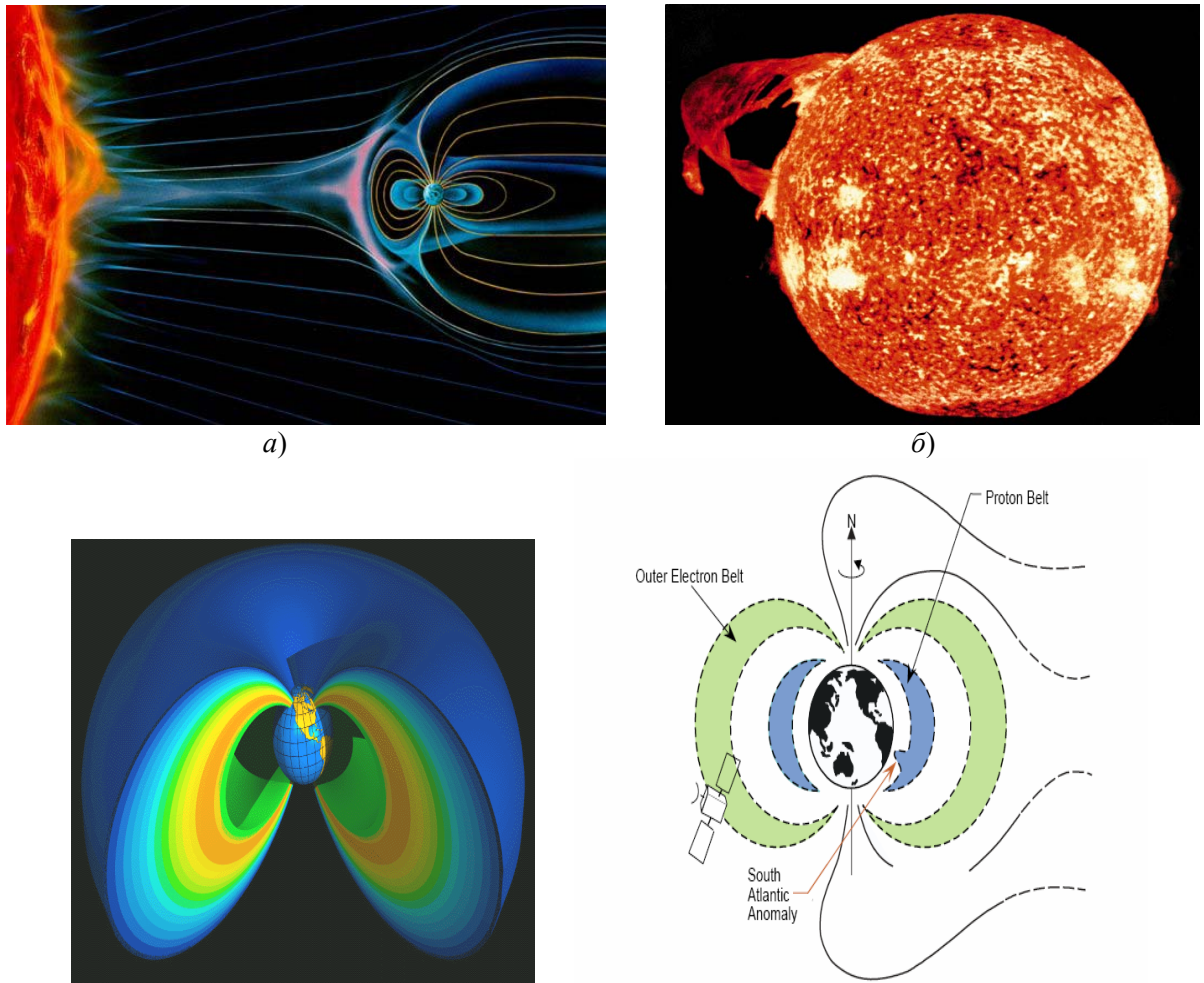
Космическая частица высокой энергии (например, протон), попадая в кремниевый кристалл, порождает очень большое количество электронов и дырок. Если полупроводниковый прибор находится в закрытом состоянии под высоким напряжением, то, из-за большой напряженности поля в приборе, количество возникающих носителей заряда возрастает лавинообразно. Это приводит к пробое, сосредоточенному в очень малой области, и может вызвать разрушение прибора. Испытания, проведенные в Германии в соляной шахте на глубине 140 м ниже уровня моря, вообще не обнаружили таких повреждений, в то время как тестирование на высоте 3480 м над уровнем моря в Швейцарских Альпах показало существенно большее число отказов, чем в лабораториях вблизи морского побережья. Подобный же эффект наблюдали при облучении полупроводниковых структур тяжелыми частицами. Поэтому, основываясь на проведенных экспериментах, был сделан вывод, что именно космическое излучение является причиной отказов подобного рода. Этот вывод теперь подтверждается многочисленными другими экспериментами [5].

Причина того, что влияние космических излучений на полупроводниковые вентили установлено лишь с появлением тиристоров *GTO*, заключается в продолжительности воздействия на них высокого напряжения [6]. В преобразователях, построенных на обычных тиристорах, обратное амплитудное напряжение прикладывается к вентилю кратковременно, например, под действием коммутирующей цепочки. Как следствие, время воздействия высокого напряжения и космического излучения на вентиль, находящийся в критическом режиме, оказывается небольшим. В тиристорах *GTO* длительность воздействия высокого напряжения составляет 50 % всего времени переключения, в связи с чем показатель частоты отказов значительно повышается. Проблема вполне объяснима, учитывая крайне сложную радиационную обстановку вокруг Земли [7]. Схема образования радиационных поясов приведена на рис. 1.

Отказы силовых полупроводниковых приборов, в основном, вызываются нейтронной компонентой космических лучей с энергией свыше 10 МэВ.

Повышение радиационной стойкости полупроводниковых элементов, работающих при обычных в эксплуатации напряжениях, подразумевает низкую вероятность отказов и может быть достигнуто с помощью определенных

технологических методов, которые не раскрываются фирмами-изготовителями силовых полупроводниковых приборов. Для снижения вероятности отказов структур (как силовых полупроводниковых приборов, работающих при высоких постоянных напряжениях в наземных условиях, так и относительно маломощных приборов авиационно-космического применения) под действием космических частиц требуется разработка радиационно стойкого монокристаллического кремния [8]. А это означает обеспечение у него высокого времени жизни как до, так и после воздействия облучения, поскольку именно этот параметр ответственен за деградацию электрофизических характеристик биполярных структур [9].



а) вспышка на Солнце; б) движение фрагментов солнечной плазмы к Земле;
 в) объемная модель радиационных поясов Земли;
 г) воздействие радиационных поясов Земли на космические аппараты

Рисунок 1 – Образование радиационных поясов Земли

Постановка задачи. Целью работы является исследование возможности использования монокристаллов кремния, легированных германием, в технологии полупроводниковых приборов, работающих при больших дозах облучения.

Основная часть исследований. Исследования проводили на монокристаллах кремния ориентации $\langle 111 \rangle$ с $N_P \approx 1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_O = (9 \dots 6) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_C < 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, легированных германием до концентрации $N_{Ge} \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и не легированных им. Выращивание монокристаллов производили по методу Чохральского (CZ-Si) в идентичных условиях из загрузки поликристаллического кремния с $N_P = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $N_B = 3,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$; $N_C < 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в протоке аргона. Бездислокационные

монокристаллы CZ-Si<P> и CZ-Si<P,Ge> разрезали на пластины и подвергали механической шлифовке и химико-механической полировке. Формирование p^+ -структур осуществляли одновременно на исследуемых образцах CZ-Si<P,Ge> и образцах сравнения из CZ-Si<P>. Для этого проводили двухстадийную диффузию бора при температурах 940 и 1250 °С (глубина залегания p - n -перехода – 5 мкм). Время жизни неосновных инжектированных носителей заряда τ_p измеряли по переходным характеристикам сформированных тестовых p^+ - n -диодов по методике работ [9]. Полученные образцы p^+ - n -структур облучали α -частицами с энергией 4 МэВ от радиоизотопного источника типа АИП-Н интегральным потоком $6,9 \cdot 10^9 \dots 2,7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Постановку экспериментов и расчет исследуемых параметров производили ана-логично описанным в работах [10]. Моделирование характера изменения τ_p выполняли с применением возможностей «MathCAD». На рис. 2 представлены экспериментальные и расчетные значения τ_p .

Для описания изменения времени жизни неосновных носителей заряда использовали расчетные формулы:

$$y_{Si}(t) = A \cdot \left(1 - \frac{\exp(a + b \cdot t)}{k} \right)^k ; \quad (1)$$

$$y_{SiGe}(t) = \frac{A}{1 + 10^{a+b \cdot t^{1,125}}} + C , \quad (2)$$

где $A = 7 \cdot 10^{-7}$; $k = -14,5$; $a = 5 \cdot 10^{-7}$; $b = 9 \cdot 10^{-6}$; $t = \Phi_\alpha / \varphi$; Φ_α – экспозиционная доза облучения α -частицами, $\varphi = 6,4 \cdot 10^6$ частиц/(см²·с); $C = 1 \cdot 10^{-7}$.

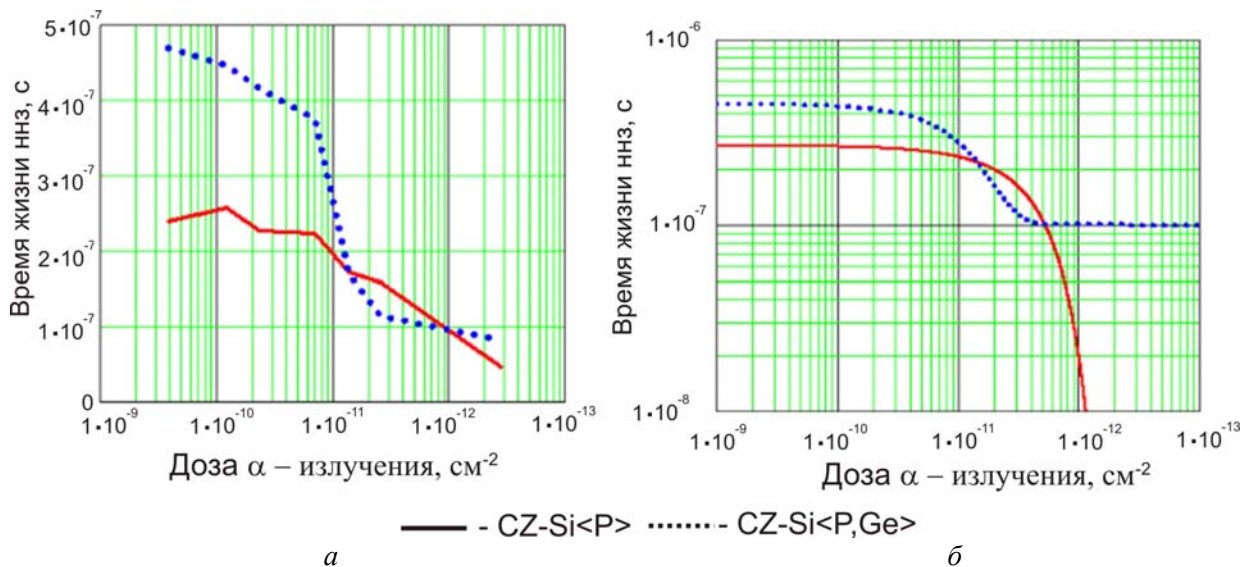


Рисунок 2 – Экспериментальные (а) и расчетные (б) значения τ_p в базе p^+ - n структур

В диапазоне доз $\sim 4 \cdot 10^9 \dots 10^{10} \text{ см}^{-2}$ наблюдаются существенно большие величины времени жизни неосновных носителей заряда в CZ-Si<P,Ge> по сравнению с CZ-Si<P>. С ростом дозы значения τ_p для обоих материалов снижаются, приближаясь к величине $\sim 8 \cdot 10^{-8} \text{ с}$. При величине $\Phi_\alpha \sim (2 \dots 3) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ экспериментальная зависимость недостаточно наглядна. Кроме того, представляет интерес поведение параметра τ_p в диапазоне больших доз облучения, достижение которых при натуральных испытаниях технически невозможно или нецелесообразно.

Для анализа поведения параметра τ_p при больших дозах облучения ($\Phi_\alpha > (2...3) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$) было произведено моделирование вида распределения разностной функции, характеризующей параметр «радиационная чувствительность материала».

В общем случае радиационная чувствительность материала является эмпирическим коэффициентом K'_τ [10], характеризующим скорость изменения времени жизни неосновных носителей заряда в базе тестовой p^+n структуры при действии облучения:

$$K'_\tau = \frac{d}{d\Phi} \left[\frac{1}{\tau(\Phi)} - \frac{1}{\tau(0)} \right], \quad (3)$$

где Φ – интегральная доза облучения; $\tau(\Phi)$, $\tau(0)$ – время жизни неосновных носителей заряда после воздействия облучения и начальное значение этой характеристики в не-облученном материале.

После подстановки измеренных значений параметра τ_p была построена зависимость функции $\lg K'_\tau$ от дозы α -облучения (рис. 3), которая имеет достаточно сложный характер. Для контрольного CZ-Si<P> четко выражен эффект увеличения $\tau(\Phi)$ в области малых доз облучения.

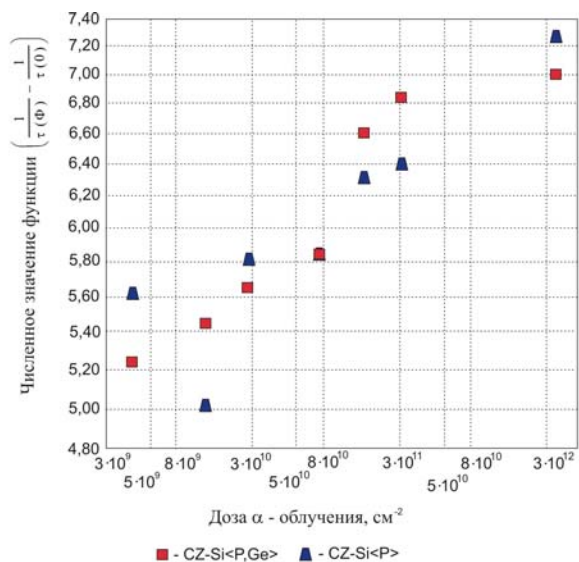


Рисунок 3 – Экспериментальные значения функции $\lg \left(\frac{1}{\tau(\Phi)} - \frac{1}{\tau(0)} \right)$ для CZ-Si<P,Ge> и CZ-Si<P>

Изучение экспериментальных данных показало целесообразность выбора для моделирования трех характерных участков изменения разностной функции (диа-пазоны доз $\Phi_\alpha = 3,82 \cdot 10^9 \dots 6,89 \cdot 10^{10}$, $\Phi_\alpha = 6,89 \cdot 10^{10} \dots 1,38 \cdot 10^{11}$, $\Phi_\alpha = 1,38 \cdot 10^{11} \dots 2,8 \cdot 10^{12}$), которую аппроксимировали с применением стандартных статистических методов (см. табл. 1).

Таблица 1 – Уравнения, выражающие зависимость радиационной чувствительности материала K'_τ от дозы α -облучения

CZ-Si<P>	$K'_\tau = 1,149 \cdot 10^3 \cdot \Phi_\alpha^{-0,806}$	$\Phi_\alpha = 3,82 \cdot 10^9 \dots 6,89 \cdot 10^{10}$
	$K'_\tau = 3,344 \cdot 10^{-11} \cdot \Phi_\alpha^{0,52}$	$\Phi_\alpha = 6,89 \cdot 10^{10} \dots 1,38 \cdot 10^{11}$
	$K'_\tau = 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot \Phi_\alpha^{-0,204}$	$\Phi_\alpha = 1,38 \cdot 10^{11} \dots 2,8 \cdot 10^{12}$
CZ-Si<P,Ge>	$K'_\tau = 0,932 \cdot \Phi_\alpha^{-0,476}$	$\Phi_\alpha = 3,82 \cdot 10^9 \dots 6,89 \cdot 10^{10}$
	$K'_\tau = 3,51 \cdot 10^{-6} \cdot \Phi_\alpha^{0,645}$	$\Phi_\alpha = 6,89 \cdot 10^{10} \dots 1,38 \cdot 10^{11}$

	$K_{\tau}' = 1,29 \cdot 10^{-5} \cdot \Phi_{\alpha}^{-0,89}$	$\Phi_{\alpha} = 1,38 \cdot 10^{11} \dots 2,8 \cdot 10^{12}$
--	--	--

Результаты расчетов по уравнениям (1) и (2), представлены на рис. 4. Особенностью построения графика является применение функции «MathCAD stack», позволяющей в автоматическом режиме производить «сшивку» многочисленных данных изменения величины разностной функции на трех выбранных характерных участках.

Обсуждение полученных результатов. Полученные экспериментальные данные могут быть объяснены постадийным образованием радиационных дефектов в облучаемых монокристаллах при наличии фоновых примесей кислорода и углерода. Как известно [11], германий и углерод препятствуют распаду пересыщенного твердого раствора кислорода в кремнии, однако механизм данного процесса для примесей германия и углерода, по-видимому, различен. Это связано как с различием размеров ато-мов и соответственно со степенью деформации решетки кремния, так и с различной химической природой примесей германия и углерода.

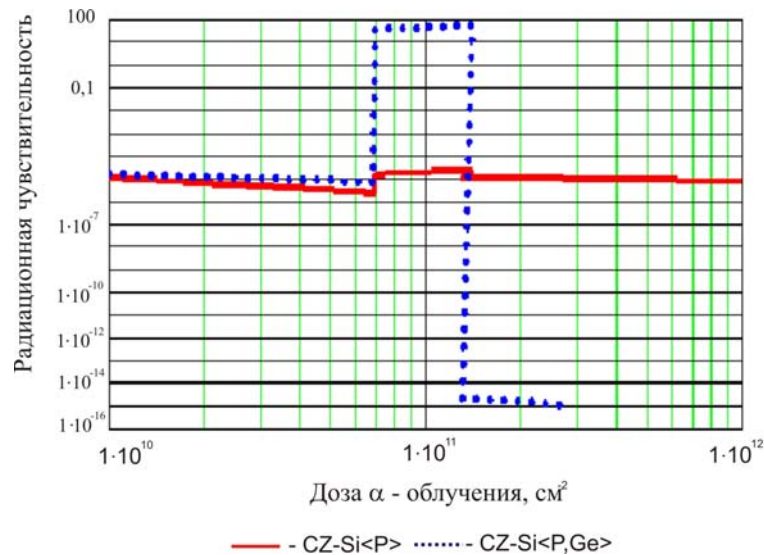


Рисунок 4 – Радиационная чувствительность контрольного CZ-Si<P> и исследуемого CZ-Si<P,Ge>

Как нами было ранее показано [12-14], в присутствии этих примесей можно говорить о коррелированном (без формирования химических связей) распределении атомов кислорода в решетке кремния, обусловленном нахождением в окрестности атомов кислорода скоплений атомов углерода и/или германия. Можно предположить, что при облучении α -частицами происходит двухстадийный процесс образования K -центров (O_i-C_i-V-V): вначале на O_i захватывается одна вакансия и до $\Phi_{\alpha} = 8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ идет образование A -центров $V-O_i$. При дозах, больших $\Phi_{\alpha} = 8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, начинается захват второй вакансии с участием близлежащих атомов углерода, то есть происходит образование K -центра. Таким образом, с увеличением концентрации углерода возрастает количество образующихся радиационных дефектов, то есть наблюдается снижение радиационной стойкости материала, фиксируемое по падению τ_p в диапазоне $\Phi_{\alpha} = 5 \cdot 10^{10} \dots 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, что может свидетельствовать об исчерпании возможностей атомов углерода «экранировать» атомы кислорода от участия в протекании реакций образования A - и K -центров. В монокристалле CZ-Si<P,Ge> наблюдается резкое падение τ_p , что обуславливает резкое снижение радиационной стойкости материала. В случае монокристалла n -Si<Ge>, после некоторого снижения τ_p в диапазоне $\Phi_{\alpha} = 5 \cdot 10^{10} \dots 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, его значения стабилизируются на уровне $\sim 10^{-7}$

с. Можно предположить, что германий локализовывает вокруг себя углерод и как бы очищает от него объем базы p^+-n структуры, обеспечив, таким образом, повышение радиационной стойкости.

Заключение. Таким образом, из результатов проведенных экспериментов следует, что время жизни τ_p , а, следовательно, и радиационная стойкость монокристаллов $CZ-Si\langle P,Ge\rangle$ зависят от дозы облучения. Это обстоятельство необходимо учитывать при конструировании и изготовлении электронных компонентов, предназначенных для работы в экстремальных условиях.

Установлено, что радиационная стойкость монокристаллов $CZ-Si\langle P,Ge\rangle$ при больших дозах α -облучения существенно выше, чем у монокристаллов $CZ-Si\langle P\rangle$, однако существует критическая величина дозы облучения, ($\Phi_\alpha \sim 7 \cdot 10^{10} \dots 1,1 \cdot 10^{11}$ см⁻²), когда радиационная стойкость резко снижается. Стабилизация τ_p при больших дозах облучения свидетельствует о возможности применения $CZ-Si\langle P,Ge\rangle$ для создания приборов с повышенной радиационной стойкостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Разумов-Раздолов, К. Л.* Эффективность работы агрегатов на основе электропривода. // Источник: журнал «Ритм» [Электронный ресурс] / Режим доступа : \www/http://mirprom.ru/Pubs.aspx?id=8788/ – 25.06.2010 г. – Загл. с экрана.
2. *Lingaitis, L.P.* Electric Drives of Traction Rolling Stocks with AC Motors [Текст] / L. P. Lin-gaitis, L. Lindvinaičius // Transport. – 2006. – Vol. XXI. – № 3. – P. 223-229.
3. Современный трехфазный тяговый привод – состояние и перспективы. ЖДМ-online Информационная служба журнала «Железные дороги мира» [Электронный ресурс] / Режим доступа : \www/http://css-rzd.ru/zdm/10-2003/03142-1.htm/ – Загл. с экрана.
4. *Камински, Н.* Воздействие космического излучения на интенсивность отказов IGBT [Текст] / Н. Камински, Т. Стясни // Силовая электроника. – 2008. – № 1. – С. 30-32.
5. Strategies for Radiation Hardness Testing of Power Semiconductor Devices, NASA/CR-2005-213807 May 2005 Paper 1021 [Электронный ресурс] / *M. Patton, R. Harris, R. Rohal et al.* – Режим доступа : \www//http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2005/CR-2005-213807.pdf/ – Загл. с экрана.
6. Los Alamos, NM Neutron-Induced Single Event Burnout in High Voltage Electronics [Электронный ресурс] / *E. Normand, J. Wert, D. Oberg et al.* – Режим доступа : \www/http://boeing.com/assocproducts/radiationlab/publications/Neutron-Induced_Single_Event_Burnout_in_High_Voltage_Electronics.pdf/ – Загл. с экрана.
7. The Auburn University Student Space Program [Электронный ресурс] / Режим доступа : \www/http://eng.auburn.edu/~strouce/DaTseminar/Wersinger07s.pdf/ – Загл. с экрана.
8. Сучасні методи підвищення радіаційної стійкості напівпровідникових матеріалів [Текст] / *Л. І. Барабаш, І. М. Вишневський, А. А. Гроза* и др. // Вопросы атомной науки и техники. – Сер. «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». – 2007. – № 2. – С. 182-189.
9. *Быткин, С. В.* Моделирование процесса накопления радиационных дефектов в процессе облучения монокристаллов $Si\langle P\rangle$ и $Si\langle P,Ge\rangle$ [Текст] / С. В. Быткин, Т. В. Критская // Металургія : наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2010. – Вип. 21. – С. 116-125.
10. *Иванов, А. М.* Свойства p^+-n структур с заглубленным слоем радиационных дефектов / А. М. Иванов, Н. Б. Строкан, В. Б. Шуман // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32. – № 3. – С. 359-365.
11. *Быткин, С. В.* Радиационная стойкость планарных $n-p-n$ -структур, изготовленных из монокристаллов кремния с различной концентрацией германия [Текст] / С. В. Быткин, Т. В. Критская // Складні системи і процеси. – 2003. – № 2. – С. 90-96.
12. Упругие напряжения в кремнии с внутренними геттерами [Текст] / *Т. В. Критская, В. Е. Кустов, Н. А. Трипачко, В. И. Шаховцов* // Электронная техника. – Сер.

- «Материалы». – 1989. – Вып. 4 (241). – С. 41-43.
13. Особенности спектров ИК-поглощения термодоноров в кристаллах Si : Ge [Текст] / Т. В. Критская, Л. И. Хируненко, В. И. Шаховцов, В. И. Яшник // Физика и техника полупроводников. – 1990. – Т. 24. – Вып. 6. – С. 1129-1132.
 14. Внутренние упругие деформации в кремнии [Текст] / В. Е. Кустов, Т. В. Критская, Н. А. Трипачко и др. // Неорганические материалы. – 1991. – № 6. – С. 1116-1118.

Стаття надійшла до редакції 28.11.2011 р.
Рецензент, проф. В.М. Михайлін