

# ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ И МНОГОСЛОЙНЫЕ КОМПОЗИЦИИ

УДК 621.315.592

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА Si<Ge>, ПРИ ДЕЙСТВИИ ГАММА–ОБЛУЧЕНИЯ

© 2012 г. С. В. Быткин<sup>1</sup>, Т. В. Критская<sup>2</sup>, Е. Г. Радин<sup>1</sup>,  
В. И. Гончаров<sup>1</sup>, Ю. И. Куницкий<sup>1</sup>, С. П. Кобелева<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь», Украина,  
<sup>2</sup>Запорожская государственная инженерная академия, Украина,  
<sup>3</sup>ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»

Проведены исследования характеристик тестовых тиристорных структур на основе выращенного методом Чохральского Si<P,Ge>, подвергнутых  $\gamma$ -облучению. Обнаружена существенно большая радиационная стойкость этих приборов по сравнению с полученными в аналогичных условиях контрольными структурами, изготовленными на монокристаллах кремния, не легированных германием.

**Ключевые слова:** кремний, монокристалл, легирование германием, тиристор,  $\gamma$ -облучение.

### Введение

Использование тиристорных структур для изготовления бортовых систем питания оборудования, работающего в условиях воздействия космического ионизирующего излучения, по мнению авторов работы [1], является невозможным, прежде всего из-за низкой радиационной стойкости многослойных биполярных приборов и их неэкономичности, связанной с падением напряжения на  $p-n$  переходах. На существующие проблемы, связанные с недостаточной радиационной стойкостью дискретных приборов для бортовых систем питания, указывалось ранее [2]. С аналогичными проблемами сталкиваются разработчики наземных систем питания, работающих при действии  $\gamma$ -излучения, в частности систем энергоснабжения ускорителей [3]. Наиболее вероятным решением перечисленных проблем в будущем может стать применение приборов на основе широкозонных материалов, например SiC [4, 5]. Однако в настоящее время экономические причины являются основным препятствием для широкого применения

этих материалов. Альтернативным подходом при создании биполярных приборов, применяемых в условиях действия облучения, может явиться их изготовление на основе кремния, легированного германием Si<Ge> [6]. В частности, в работе [7] была показана возможность работы дискретных приборов на основе Si<Ge> в полях ионизирующих излучений и приведена вертикальная структура прибора.

Цель работы — испытание выборок из партий тиристорных структур, изготовленных на основе Si и Si<Ge>, и оценка возможности их использования в условиях действия  $\gamma$ -излучения с применением методов статистического анализа

### Экспериментальная часть

При изготовлении маломощных тиристорных структур (обратное приложенное напряжение до 100 В) использовали монокристаллы кремния, выращенные по методу Чохральского, с концентрацией фосфора  $\sim 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , германия  $\sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  (CZ-Si<P, Ge>) и контрольные монокристаллы с такой же концентрацией фосфора

(CZ-Si<P>), не содержащие германий. Концентрации кислорода и углерода в монокристаллах составляли:  $N_O = 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_C = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (верхний торец) и  $N_O = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_C = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (нижний торец) соответственно. Тиристоры изготавливали по диффузионной планарной технологии. Облучение  $\gamma$ -квантами проводили в диапазоне доз от 0 до  $2,94 \cdot 10^6$  мЗв.

Для обработки полученных результатов использовали возможности среды STATISTICA 6.0. Измеряли ток удержания тиристора  $I_{\text{hold}}$ , ток утечки  $I_{\text{leak}}$ , прямое падение напряжения  $U_{\text{drop}}$  и ток управления  $I_{\text{base}}$  при приложении обратного напряжения 100 В. Измерения проводили в соответствии с нормативно-техническими документами [8, 9] на специально изготовленном тестирующем стенде.

### Результаты и их обсуждение

Наиболее чувствительным к действию облучения является ток удержания тиристора  $I_{\text{hold}}$ . Полученные результаты указывают на линейное увеличение средних значений  $I_{\text{hold}}$  для контрольных образцов тиристоров, изготовленных на CZ-Si<P> и практически полное отсутствие изменений численных значений этой величины для тиристоров, изготовленных на CZ-Si<P, Ge> (рис. 1). Низкая чувствительность  $I_{\text{hold}}$  тиристора на основе CZ-Si<P, Ge> к облучению может быть объяснена замедленной деградацией основных электрофизических характеристик этого материала в условиях действия облучения [10, 11].

Полученный результат хорошо согласуется с известной приближенной формулой [12], выражающей зависимость плотности тока удержания (выключения) тиристора:

$$I_{\text{hold}} \cong \frac{W_n}{\tau_p \mu_p \rho_n \ln \frac{1}{1 - \alpha_2}},$$

где  $W_n$  — толщина  $n$ -базы тиристора;  $\tau_p$ ,  $\mu_p$  — время жизни и подвижность неосновных носителей заряда в  $n$ -базе тиристора соответственно;  $\rho_n$  — удельное сопротивление материала  $n$ -базы тиристора;  $\alpha_2$  — коэффициент передачи тока  $n$ - $p$ - $n$ -фрагмента тиристора с узкой  $p$ -базой.

Наиболее чувствительным параметром к действию  $\gamma$ -излучения является  $\tau_p$ , уменьшение которого и определяет изменение тока удержания тиристора.

Высокая радиационная стойкость тиристоров, изготовленных на CZ-Si<P, Ge> подтверждена характером дозовой зависимости токов утечки (рис. 2).

Сформулированные в работе [13] общие требования к созданию радиационно стойкой выпрямительной структуры требуют использования тонкой сильнолегированной базы, т. е. изготовления низковольтных приборов. На минимальную толщину

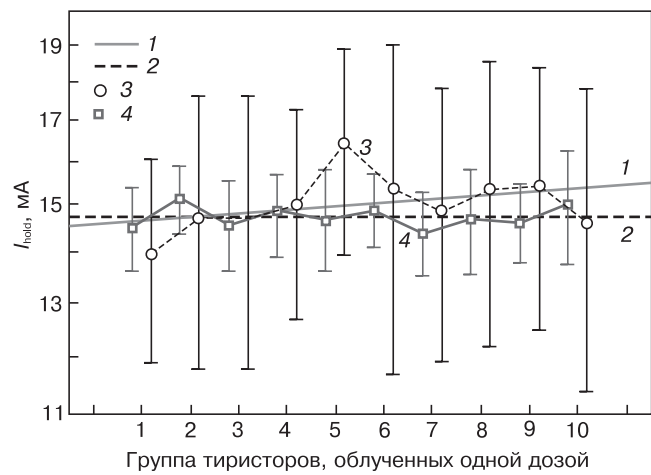


Рис. 1. Зависимости тока удержания  $I_{\text{hold}}$  тиристоров на основе CZ-Si<P> (1, 3) и CZ-Si<P, Ge> (2, 4) от дозы  $\gamma$ -облучения: 1, 2 — средние значения  $I_{\text{hold}}$ ; 3, 4 — эксперименты. Здесь и далее: группа 1 — доза облучения равна 0; группа 10 — доза облучения  $2,94 \cdot 10^6$  мЗв. Облучение проводили при равномерном возрастании дозы в этом диапазоне

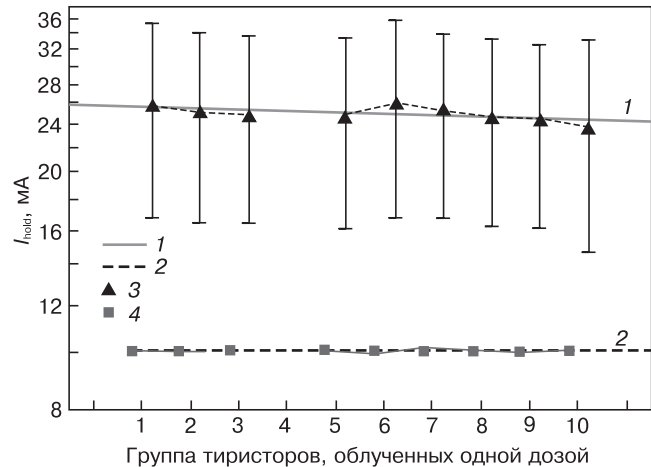


Рис. 2. Зависимости токов утечки  $I_{\text{leak}}$  тиристоров на основе CZ-Si<P> (1, 3) и CZ-Si<P, Ge> (2, 4) от дозы  $\gamma$ -облучения: 1, 2 — средние значения  $I_{\text{leak}}$ ; 3, 4 — эксперимент

базы накладываются существенные ограничения, связанные большей частью с обратным смещением. Для запертого состояния структуры необходимо иметь минимальные обратные токи при максимально допустимых обратных напряжениях. С уменьшением же размеров базы (в случае тонкой базы) значение обратного тока растет, а максимально допустимое обратное напряжение падает (из-за возможного пробоя базы). Поэтому чем ниже напряжение электрического пробоя диода, тем меньше максимально возможная толщина объемного заряда  $p$ - $n$ -перехода и тем тоньше может быть сделана база без опасности пробоя. Если все же требуются диоды на большое обратное напряжение с повышенной радиационной стойкостью, то используют последовательное соединение идентичных структур с тонкой сильнолегированной базой, изготовленных в едином технологическом цикле. Однако это решение не всегда приемлемо с конструктивной точки зрения. Полученные результаты

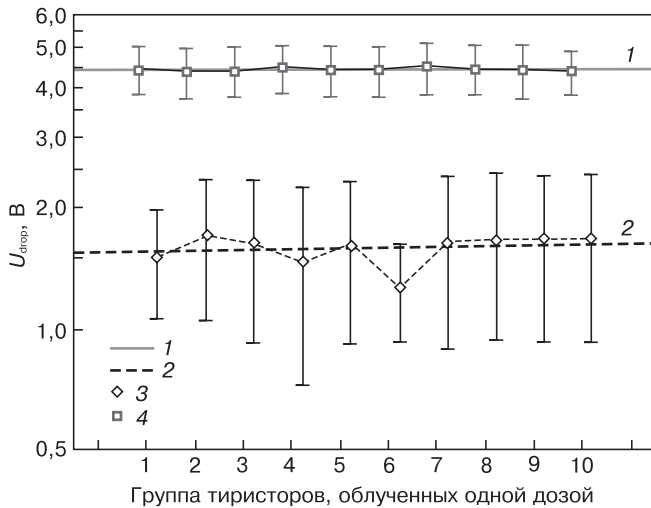


Рис. 3. Зависимости прямого падения напряжения  $U_{drop}$  для тиристоров на основе CZ-Si<P> (1, 3) и CZ-Si<P,Ge> (2, 4) от дозы  $\gamma$ -облучения: 1, 2 — средние значения  $U_{drop}$ ; 3, 4 — эксперимент

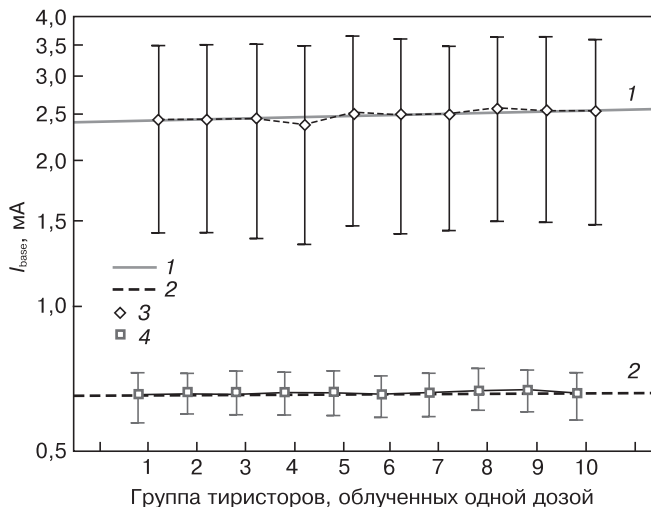


Рис. 4. Зависимости тока управления  $I_{base}$  тиристоров на основе CZ-Si<P> (1, 3) и CZ-Si<P,Ge> (2, 4) от дозы  $\gamma$ -облучения: 1, 2 — средние значения параметра  $I_{base}$ ; 3, 4 — эксперимент

позволяют говорить о Si<Ge> как о материале, применение которого может способствовать разработке базовых технологий современной электропреобразовательной техники, включая IGBT-модули, запираемые тиристоры с жестким выключением IGCT и другие приборы [14].

Полученные результаты зависимости  $I_{leak}$  от дозы  $\gamma$ -облучения существенно отличаются от расчетных, приведенных в работе [15], хотя обратный ток диода ничем не отличается от обратного тока коллекторного перехода транзисторов  $J_{cbr}$ , что требует проведения дополнительного анализа.

Для тиристорных структур радиационно чувствительным параметром является прямое падение напряжения. Для контрольных приборов, изготовленных на CZ-Si<P>, в исследованном диапазоне доз облучения наблюдается плавное увеличение  $U_{drop}$  в полном соответствии с работой [16], а та же характеристика для тиристоров, изготовленных на

CZ-Si<P, Ge>, не изменяется, хотя ее численное значение примерно в 3 раза выше, чем для контрольных приборов (рис. 3). Для объяснения полученных результатов понадобится проведение специального исследования дозовой зависимости  $\tau_p$ .

В процессе исследований было также установлено, что ток управления тиристорной структуры в исследованном диапазоне экспозиционных доз  $\gamma$ -облучения слабо зависит от действия излучения (рис. 4).

### Заключение

Установлено, что по всем основным электрофизическим характеристикам тиристоры, изготовленные на основе CZ-Si<P,Ge> обладают существенно более высокой радиационной стойкостью в диапазоне доз  $\gamma$ -излучения от 0 до  $2,94 \cdot 10^6$  мЗв, чем контрольные n-p-n-p-структуры.

На основе результатов обработки экспериментальных данных с использованием возможностей среды STATISTICA 6.0 показана целесообразность использования CZ-Si<P,Ge> для улучшения рабочих характеристик приборов и уменьшения их деградации при действии  $\gamma$ -облучения.

Применение CZ-Si<P,Ge> может способствовать разработке базовых технологий современной электропреобразовательной техники, например IGBT-модулей на ток до 3000 А и напряжение до 6500 В, запираемых тиристоров IGCT с жестким выключением на ток до 6000 А, напряжение до 8000 В и других приборов.

Необходимо дополнительное изучение особенностей деградации времени жизни неосновных носителей заряда в n-базе тиристора, изготовленного на основе CZ-Si<P,Ge>, для последующего моделирования деградации планарной n-p-n-p-структуры, работающей под действием ионизирующего излучения.

### Библиографический список

1. Bruemmer, J. E. Schmitz Efficient Design in a DC to DC Converter Unit. / J. E. Bruemmer, F. R. Williams // NASA Technical Memorandum E-13499 prepared for the 37th Intersociety energy conversion engineering conf. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2002/TM-2002-211804.pdf>
2. Keller, J. Power electronics designers look to the future / J. Keller // Military and aerospace electronics. November. 2002. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // [http://mae.pennnet.com/articles/article\\_display.cfm?Section=ARCHI&C=Feat&ARTICLE\\_ID=161973&KEYWORDS=Schottky%20QPL&p=32](http://mae.pennnet.com/articles/article_display.cfm?Section=ARCHI&C=Feat&ARTICLE_ID=161973&KEYWORDS=Schottky%20QPL&p=32)
3. Rausch, R. Electronic components and systems and their radiation qualification for use in the LHC machine / R. Rausch // European laboratory for particle physics, CERN-SL division CERN SL 99-004 (CO). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // [http://www-project.slac.stanford.edu/lc/local/Radphysics/European\\_Lab.pdf](http://www-project.slac.stanford.edu/lc/local/Radphysics/European_Lab.pdf)
4. Ozipinci, B. Comparison of wide-bandgap semiconductors for power electronics applications / B. Ozipinci, L. M. Tolbert // ORNL/TM-2003/257, December 12, 2003 OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY Oak Ridge, Tennessee 37831, managed by UT-BATTELLE, LLC for the U.S. DEPARTMENT OF ENERGY under contract No. DE-AC05-00OR22725 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: / <http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/rpt/118817.pdf>
5. Лебедев, А. SiC-электроника: прошлое, настоящее, будущее / А. Лебедев, С. Сбруев // Электроника. Выпуск № 5/2006

Элементная база электроники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: / <http://www.electronics.ru/issue/2006/5/4>

6. Dyer, C. S. Space radiation effects for future technologies and missions / C. S Dyer, G. Hopkinson (Rep.ref.QINETIQ/KI/SPACE/TR010690/1.1) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // [http://reat.space.qinetiq.com/Reat/wp1\\_tn/Document\\_text.html](http://reat.space.qinetiq.com/Reat/wp1_tn/Document_text.html)

7. Bytkin, S. V. Silicon doped with germanium (n-Si<Ge>) usage for manufacturing of radiation hardened devices and integrated circuits / S. V. Bytkin // 4<sup>th</sup> Europ. Conf. on radiation and its effects on components and systems Proc. Cannes (France). – 1997. – P. 141–146.

8. ГОСТ 19138.0–85. Тиристоры. Общие требования к методам измерения параметров. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // <http://gosts.skgvh.ru/Index/20/20337.htm>

9. ГОСТ 19138.6–86. Тиристоры. Методы измерения электрических параметров. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // <http://gosts.skgvh.ru/Index/12/12223.htm>

10. Критская, Т. В. Управление свойствами и разработка промышленной технологии монокристаллического кремния для электроники и солнечной энергетики / Т. В. Критская // Дисс. ... докт. техн. наук. – Запорожье, 2006. – 375 с.

11. Быткин, С. В. Материалы и процессы в технологии кремниевых приборов, устойчивых к действию ионизирующих излучений: анализ эффективности применения / С. В. Быткин, О. В. Быткина. – Запорожье: Изд-во ЗГИА, 1997. – 84 с.

12. Кузьмин, В. А. Четырехслойные полупроводниковые приборы / В. А. Кузьмин, К. Я. Сенаторов. – М.: Энергия, 1967. – 184 с.

13. Вологдин, Э. Н. Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборов / Э. Н. Вологдин, А. П. Лысенко. – М., 2001. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // [http://window.edu.ru/window/library?p\\_rid=55864](http://window.edu.ru/window/library?p_rid=55864)

14. О Федеральной целевой программе «Национальная технологическая база» на 2007–2011 годы (в ред. Постановления Правительства РФ от 26.11.2007 № 809). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // <http://www.intpark.noolab.ru/uploads/1245030251.doc>

15. Вологдин, Э. Н. Радиационная стойкость биполярных транзисторов / Э. Н. Вологдин, А. П. Лысенко. – М., 2000. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // [http://window.edu.ru/window/library?p\\_rid=558643](http://window.edu.ru/window/library?p_rid=558643)

16. Герлах, В. Тиристоры / В. Герлах – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 345 с.

УДК 621.315.592

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРВОГО КАСКАДА ТРЕХКАСКАДНОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФОСФОРА В ГЕРМАНИИ

© 2012 г. С. П. Кобелева<sup>1</sup>, И. М. Анфимов<sup>1</sup>, Б. В. Жалнин<sup>2</sup>,  
О. В. Торопова<sup>1</sup>, Т. В. Критская<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

<sup>2</sup>Научно–производственное предприятие «Квант»

<sup>3</sup>Запорожская государственная инженерная академия, Украина

Методом МОС–гидридной эпитаксии изготовлены структуры  $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}/\text{In}_{0,56}\text{Ga}_{0,44}\text{P}/\text{Ge}$ , представляющие собой первый каскад трехкаскадных солнечных элементов  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}/\text{Ge}$ .  $\text{P}-n$ -переход сформирован диффузией фосфора в германий, легированный галлием. Методом ВИМС получены профили фосфора и галлия в германии. Показано, что изменение потока фосфина не влияет на характер распределения фосфора и глубину  $\text{p}-n$ -перехода в германиевом каскаде.

**Ключевые слова:** диффузия фосфора в германии, координатно–зависимая диффузия, солнечный элемент, гетероструктура  $\text{InGaP}/\text{Ge}$ .

Диффузия фосфора — технологический этап создания  $\text{p}-n$ -перехода в германии в составе трехкаскадного солнечного элемента на основе соединений  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  [1, 2]. Моделирование процесса диффузии и расчет профиля распределения фосфора в зависимости от технологических условий получения структуры позволяет оптимизировать технологические режимы без привлечения дорогостоящих экспериментов. В работе [2] было показано, что известные диффузионные модели фосфора в германии неудовлетворительно описывают определенную методом электрохимического профилирования глубину залегания  $\text{p}-n$ -переходов в германиевом субэlemente. Цель работы — экспериментальное определение профилей распределения фосфора в германии в структуре  $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}/$

$\text{In}_{0,56}\text{Ga}_{0,44}\text{P}/\text{Ge}$  и изучение влияния на распределение фосфора потока фосфина на первом этапе технологического цикла создания первого каскада трехкаскадного солнечного элемента.

Образцы для исследования были получены методом МОС–гидридной эпитаксии на реакторе Veeco E450 LDM. На германиевую подложку с ориентацией (100), легированную галлием (до концентрации  $N_{\text{Ga}} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), на первом этапе из газовой фазы при температуре 635 °С проведена диффузия фосфора в течение 2,5 мин. Затем нанесен буферный слой  $\text{In}_{0,49}\text{Ga}_{0,51}\text{P}$  (в течение 1 мин при  $T = 635 \text{ °C}$ ) и сильнолегированный слой  $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$  (1,6 мин. при той же температуре). В образцах 1–3 варьировали поток фосфина (600, 800 и 1200  $\text{ см}^3/\text{мин}$  соответственно).