

УДК 621.385

С.В. Быткин, Т.В. Критская

**РАДИАЦИОННАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПЛАНАРНЫХ NPN СТРУКТУР,  
ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ИЗОВАЛЕНТНО ЛЕГИРОВАННОМ ГЕРМАНИЕМ  
КРЕМНИИ (nSiGe)**

**Аннотация.** Исследована радиационная чувствительность прп структур, изготовленных на кремни, легированном германием (*nSiGe*). Показано, что скорость деградации усилительных свойств тестового планарного транзистора нелинейно зависит как от концентрации изовалентной примеси, так и от дозы  $\alpha$ -облучения, причём характер зависимости определяется шириной базы прибора. Полученные зависимости подтверждают возможность использования *nSiGe* для изготовления дискретных полупроводниковых приборов, устойчивых к действию ионизирующего излучения.

**Ключевые слова.** Кремний, легированный германием, деградация усилительных свойств, тестовый транзистор, действие ионизирующего излучения.

**Annotation.** The radiation sensitivity of *npn* structures fabricated on germanium-doped silicon (*nSiGe*) was investigated. It was shown that the rate of degradation of the amplifying properties of the test planar transistor depends nonlinearly on both the concentration of isovalent impurity and the dose of  $\alpha$ -irradiation, and the nature of the dependence is determined by the width of the base of the device. The dependences confirm the possibility of using *nSiGe* for the manufacture of discrete semiconductor devices that are resistant to the action of ionizing radiation.

**Keywords.** Germanium-doped silicon, degradation of amplifying properties, test transistor, ionizing radiation action.

**Постановка проблемы в общем виде**

Создание полупроводниковых материалов для изготовления радиационно-стойких 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), сводящиеся к примесному управлению физическими свойствами полупроводниковых материалов путём воздействия на образование примесно-дефектных комплексов (электрически активные дефекты) и/или их кластеры, создающие глубокие энергетические уровни в полупроводниках – эффективные ловушки для инжектированных неосновных носителей заряда в прп, прпр структурах [2]. Рекомбинационные свойства

дефектов (А-центров, прежде всего) существенно ухудшают рабочие характеристики облучённых полупроводниковых устройств.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Для подавления концентрации А-центров необходимы инженерные стратегии управления дефектообразованием в материале неоднородных активных структур микроэлектронных и дискретных устройств [3,4]. В частности, предлагается использование изовалентных примесей (прежде всего, германия (Ge), свинца и олова (Sn)) для управления процессом формирования комплексов VO в Si, хотя это и связано с изменением его структурных и физических свойств за счёт различных ковалентных радиусов примесей и легируемой матрицы. Изовалентные примеси замещают атомы Si, но являются электрически неактивными. Показано, что с прикладной точки зрения наиболее перспективно использование Ge [5]. Процессы радиационного дефектообразования в кремнии, легированном германием, определяющие стабильность его электрофизических свойств в условиях действия ионизирующего облучения, носят сложный характер, эффективность протекания этих процессов нелинейно связана с интегральной дозой облучения [6].

### **Выделение нерешённых научно-технических задач**

Возможность использования nSiGe (Si<P, Ge>) для повышения радиационной стойкости многослойных npr, prpr структур может быть подтверждена только изготовлением тестовых приборов на Si с различной концентрацией легирующего Ge с проведением их испытаний [7]. Целью настоящей работы является сравнительная оценка деградации  $h_{21E}$  тестовых npr структур ИС, изготовленных на nSiGe с различной концентрацией Ge и шириной базы, к действию  $\alpha$ -излучения для подтверждения технологической применимости изовалентно легированного Ge кремния для формирования работоспособных в полях ионизирующих излучений приборных структур.

### **Изложение основного материала**

Наиболее удобной структурой для экспериментальных измерений деградации  $h_{21E}$  при облучении является тестовый npr транзистор ИС с диэлектрической изоляцией, радиационная деградация которого полностью определяется свойствами однородно легированной Ge исходной монокристаллической пластины SiGe n-типа[8]. Измерения проводили на

кремний ориентации <111> с  $\rho \approx 0,2$  Ом·см,  $N_{\text{O}_i} \approx 7 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>,  $N_{\text{Ge}} < 5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, легированных германием и контрольных по методу Чохральского (CZ-Si) в идентичных условиях из загрузки поликристаллического Si в потоке аргона [9]. Бездислокационные монокристаллы CZ-Si<P> и CZ-Si<P, Ge> разрезали на пластины и подвергали механической шлифовке и химико-механической полировке [10]. На одной из сторон пластины создан  $n^+$ -слой, проведено окисление поверхности подложки, с использованием фотолитографии в пленке  $\text{SiO}_2$  вскрыты окна, т.е. создана маска для анизотропного травления, через которую вытравлена V-образная канавка, стенки которой окислены. Поверх пленки  $\text{SiO}_2$  наращен эпитаксиальный поликристаллический слой кремния толщиной 300...600 мкм, после чего пластина перевёрнута, сошлифована и отполирована со стороны монокристаллического кремния. В результате получена подложка с изолированными областями (карманами) монокристаллического кремния. Слой поликристаллического кремния, в котором сформированы углублённые области монокристаллического SiGe, является несущей подложкой. В каждом из карманов по обычной планарной технологии формируют приструктуры, на которых проводятся измерения  $h_{21E}$  до и после облучения. Используем известную формулу [11] для оценки радиационной деградации  $h_{21E}$  при структуры для сравнения эффективности влияния различных уровней легирования германием на радиационную стойкость тестового интегрального транзистора. Изменения  $h_{21E}$  после облучения могут быть выражены следующей формулой:

$$\frac{1}{h_{21E}(\Phi_\alpha)} - \frac{1}{h_{21E}(0)} = F(\Phi_\alpha); \quad K_{21E} = \frac{d}{d\Phi_\alpha} F(\Phi_\alpha),$$

где  $h_{21E}(\Phi_\alpha)$ ,  $h_{21E}(0)$  – коэффициент усиления (схема с ОЭ) при транзистора после и до  $\alpha$ -облучения соответственно;  $\Phi_\alpha$  – поток  $\alpha$ -частиц, см<sup>-2</sup>;  $K_{21E}$  – экспериментальная постоянная, часто называемая радиационной чувствительностью, физический смысл которой – скорость деградации  $h_{21E}$ ; обычно используется для сравнения радиационной стойкости транзисторов, изготовленных по различной технологии.

Используя экспериментальные значения  $h_{21E}$  до и после облучения [12], и применяя стандартные статистические методы, получены уравнения, описывающие деградацию при-структур в зависимости от уровня изовалентного легирования и геометрии вертикальной структуры. Дозовая зависимость  $K_{21E}$  указывает на существенное различие скорости деградации

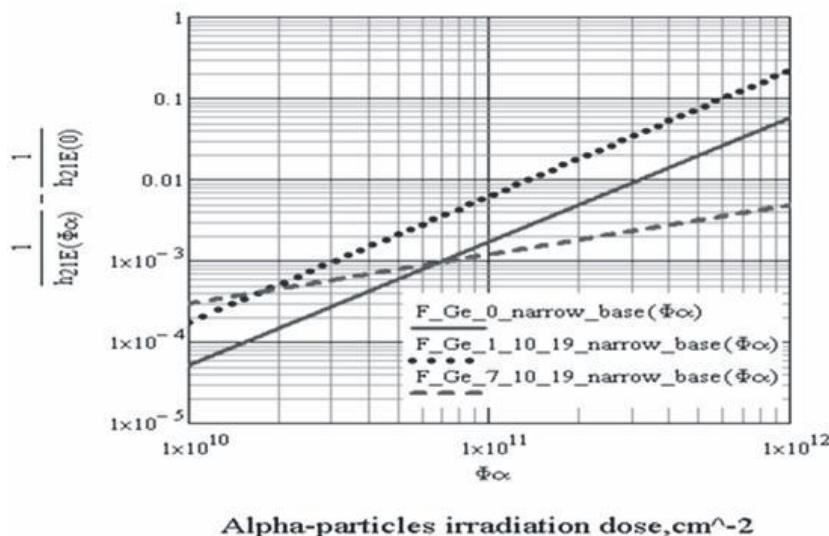
усилительных свойств тестовых транзисторных структур, изготовленных на кремнии, с различным содержанием Ge:

Таблица 1

Расчетные формулы для вычисления деградации  $h_{21E}$  и  $K_{21E}$

N <sub>Ge</sub> исходной пластины	в	Ширина р-базы транзисторной прип структуры	
		Широкая ( $\approx 0.35 \mu\text{m}$ )	Узкая ( $\approx 0.25 \mu\text{m}$ )
0		$F(\Phi_\alpha) = 1.042 \cdot 10^{-3} \Phi_\alpha^{0.971}$ $K_{h_{21E}} = dF(\Phi_\alpha)/d\Phi_\alpha =$ $= 1.012 \cdot 10^{-13} \Phi_\alpha^{-0.029}$	$F(\Phi_\alpha) = 2.97 \times 10^{-20} \Phi_\alpha^{1.524}$ $K_{h_{21E}} = dF(\Phi_\alpha)/d\Phi_\alpha =$ $= 4.53 \times 10^{-20} \Phi_\alpha^{0.524}$
$1.3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$		$F(\Phi_\alpha) = 1.997 \times 10^{-15} \Phi_\alpha^{1.13}$ $K_{h_{21E}} = 2.257 \times 10^{-15} \Phi_\alpha^{0.13}$	$F(\Phi_\alpha) = 5.56 \times 10^{-20} \Phi_\alpha^{1.55}$ $K_{h_{21E}} = 8.62 \times 10^{-20} \Phi_\alpha^{0.55}$
$7.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$		$F(\Phi_\alpha) = 2.455 \times 10^{-12} \Phi_\alpha^{0.828}$ $K_{h_{21E}} = 2.033 \times 10^{-12} \Phi_\alpha^{-0.172}$	$F(\Phi_\alpha) = 2.65 \times 10^{-10} \Phi_\alpha^{0.605}$ $K_{h_{21E}} = 1.37 \times 10^{-10} \Phi_\alpha^{-0.395}$

Для микроэлектронных планарных структур с тонкой ( $\approx 0.25 \mu\text{m}$ ) базой возможность применения SiGe практически полностью зависит от диапазона доз  $\Phi_\alpha$ : в области низких значений (до  $10^{11} \text{ см}^{-2}$ )  $h_{21E}$  прип структур, сформированных на исходных пластинах с  $N_{Ge} = 7.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  **ниже** (обратная величина **выше**), чем для приборов на нелегированном ( $N_{Ge} = 0$ ) и слаболегированном ( $N_{Ge} = 1.2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) кремни. После  $\Phi_\alpha \geq 10^{11} \text{ см}^{-2}$  заметен эффект увеличения замедления радиационной деградации  $h_{21E}$  прип структур, сформированных на пластинах с  $N_{Ge} = 7.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , рис.1:



Alpha-particles irradiation dose,  $\text{cm}^{-2}$

Рисунок 1 – Сравнение эффективности применения SiGe для замедления деградации  $h_{21E}$  прип структур, ширина базы  $\approx 0.25 \mu\text{m}$ , изготовленных на пластинах с различным содержанием Ge при различных  $\Phi_\alpha$ .

Использование SiGe с  $N_{Ge} = 7,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  позволяет обеспечить существенное снижение радиационной чувствительность при структуры  $K_{h21E}$  во всём диапазоне исследуемых доз  $\alpha$ -частиц (рис.2):

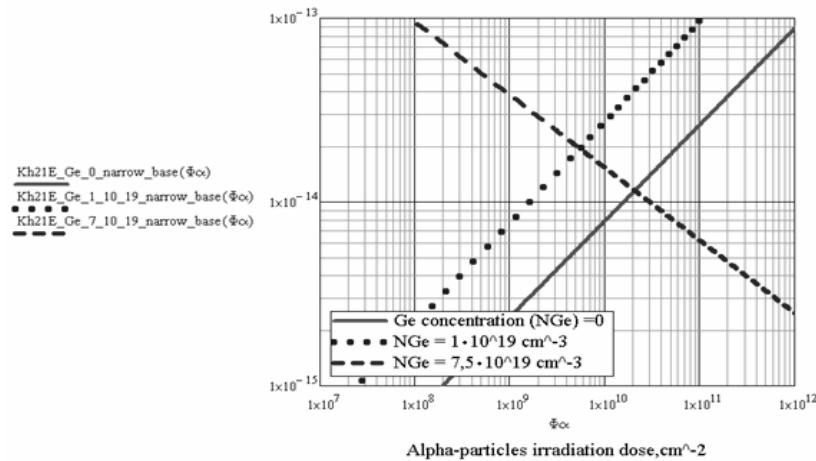


Рисунок 2 – Зависимость радиационной чувствительности ( $K_{h21E}$ ) тестового при транзистора (ширина базы  $\approx 0,25 \text{ мкм}$ ) в диапазоне  $1 \cdot 10^7 \leq \Phi_\alpha \leq 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$

Для при структур с широкой ( $\approx 0,35 \text{ мкм}$ ) базой, изготовленных на пластинах с различным содержанием Ge при различных  $\Phi_\alpha$  наблюдается выраженный эффект замедления деградации коэффициента усиления, описываемый функцией  $F(\Phi_\alpha)$ : для структур, изготовленных на пластинах  $cN_{Ge} = 1,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и  $N_{Ge} = 7,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  наблюдается существенно более высокая радиационная стойкость, чем для транзисторов на Si с  $N_{Ge} = 0$  (рис.3):

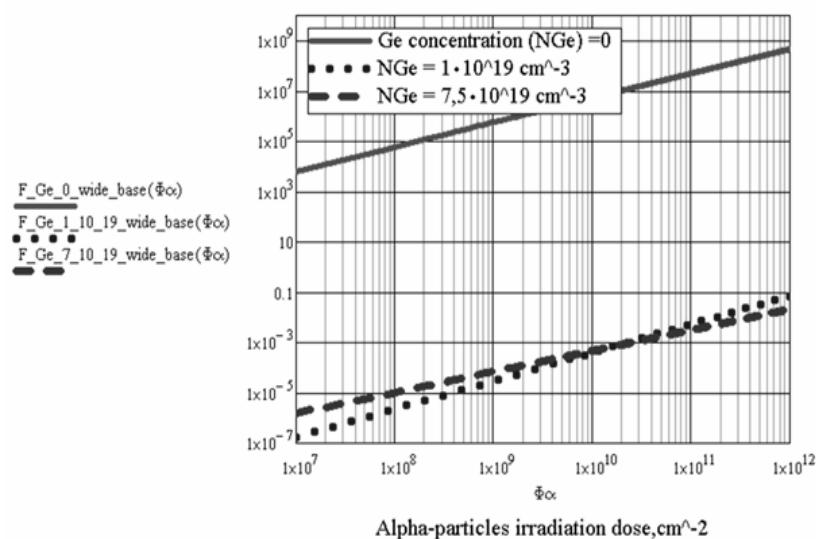


Рисунок 3 – Эффект замедления радиационной деградации усиительных свойств при структур с широкой ( $\approx 0,35 \text{ мкм}$ ) базой, изготовленных на  $\text{SiGe} N_{Ge} = 1,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и  $N_{Ge} = 7,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  по сравнению с транзисторами на Si с  $N_{Ge} = 0$ , слабо зависящий от концентрации Ge

Эффективное снижение радиационной чувствительности

$$K_{21E} = \frac{d}{d\Phi_\alpha} F(\Phi_\alpha)$$

наблюдается только для структур, изготовленных на SiGeN<sub>Ge</sub> = 7,5·10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup> (рис.4):

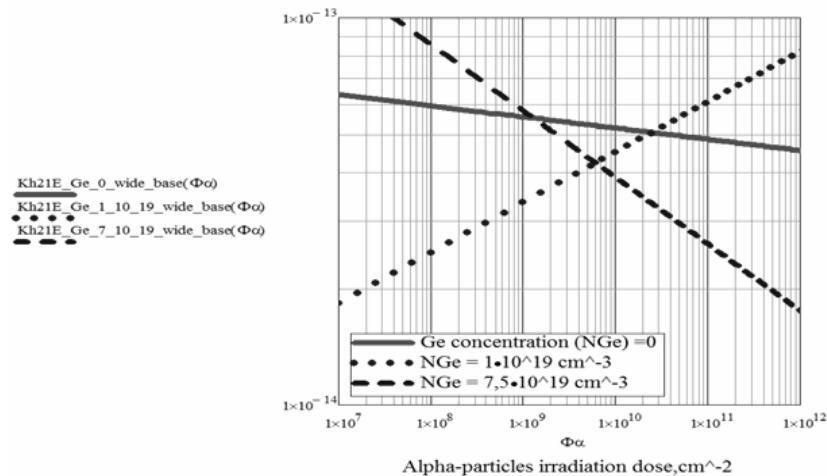


Рисунок 4 – Зависимость радиационной чувствительности ( $K_{21E}$ ) тестового при транзистора (ширина базы  $\approx 0,35$  мкм) в диапазоне  $1 \cdot 10^7 \leq \Phi_\alpha \leq 1 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>

### Выводы из проведенного исследования и перспективы дальнейшего поиска

Полученные результаты объясняют экспериментально наблюдаемую высокую радиационную стойкость дискретных маломощных тиристоров, изготовленных по планарной технологии [13,14] на изовалентно легированном германием кремнием. Используются, видимо, оба механизма замедления деградации свойств pnp структуры, изготовленной на nSiGe: как снижение  $K_{21E}$  pnp транзистора эквивалентной схемы прибора, так и уменьшения рекомбинационного тока базы сочетания pnp слоёв за счёт уменьшения вероятности радиационного дефектообразования [15]. Исследование взаимодействия этих механизмов будет являться предметом дальнейших исследований.

### ЛИТЕРАТУРА

- Efstratia N. Sgourou, Yerasimos Panayiotatos, Ruslan V. Vovk, Alexander Chroneos. Toward Defect Engineering Strategies to Optimize Energy and Electronic Materials. Review. Appl. Sci. 2017, 7, 674; doi:10.3390/app7070674
- A. Alkauskas, M. D. McCluskey, Chris G. Van de Walle. Tutorial: Defects in semiconductors—Combining experiment and theory. Journal of Applied Physics, 119(18), 181101, 2016 https://doi.org/10.1063/1.4948245

3. A. Chroneos, C. A. Londos, E. N. Sgourou, P. Pochet. Point defect engineering strategies to suppress A-center formation in silicon. *Appl. Phys. Lett.* 99, 241901 (2011); doi: 10.1063/1.3666226. View online: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3666226>
4. C. A. Londos, E. N. Sgourou, D. Hall, A. Chroneos. Vacancy-oxygen defects in silicon: the impact of isovalent doping. *J. Mater. Sci.: Mater Electron* (2014) 25:2395–2410 <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-014-1947-6>
5. Критская Т. В. Современные тенденции получения кремния для устройств электроники: монография / Т. В. Критская; Запорож. гос. инженер. акад. - Запорожье: ЗГИА, 2013. - 353 с.
6. Быткин С.В., Критская Т.В. Моделирование S-образного процесса накопления А- и Е-центров в изовалентно легированном германием кремни в среде Statistica и MathCAD. «Сучасні проблеми металургії», № 21, випуск 1- 2018. С. 29-35
7. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах и методы испытаний изделий полупроводниковой электроники на радиационную стойкость [Учебн. пос. по дисципл. «Радиационная стойкость изделий электронной техники»] / Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. - М.: Научно-образовательный центр Московского региона в области фундаментальных проблем радиационной физики твердого тела и радиационного материаловедения. Московский государственный институт электроники и математики. - 2002. - 46 с.
8. S. Bytkin. Use of germanium doped silicon (n-SiGe) for manufacturing radiation hardened devices and integrated circuits. Conference Paper. October 1997. DOI: 10.1109/RADECS.1997.698872. Conference: Radiation and Its Effects on Components and Systems, 1997. RADECS 97. Fourth European Conference on)
9. Критская Т.В. Управление свойствами и разработка промышленной технологии монокристаллического кремния для электроники и солнечной энергетики: дисс. доктора техн. наук: 05.16.03 / Критская Татьяна Владимировна. – Запорожье, 2006. – 375 с.
10. Троян П.Е. Микроэлектроника: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. - 346 с.
11. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / Под ред. Е. А. Ладыгина. — М.: Сов. Радио, 1980. — 224 с.
12. Быткин С.В. Конкурентная разведка конъюнктурно-технологических перспектив традиционного и high-tech экспорта Украины: монография / Быткин С.В.; Запоріз. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2017. – 276с.
13. Быткин С.В., Критская Т.В., Радин Е.Г., Гончаров В.И., Куницкий Ю.И., Кобелева С.П. Экспериментальное исследование характеристик тиристоров, изготовленных на Si<Ge>, при действии гамма-облучения. Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. №3, 2012, стр. 45-48.
14. Быткин С.В., Критская Т.В., Кобелева С.П. Статистический анализ влияния Ge на радиационную и термическую стабильность электрофизических характеристик приборных n-p-n-p-структур на основе CZ-Si<P, Ge>. Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. № 4, 2013, стр. 42-48.

15. Быткин С. В., Критская 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, стор.116-125.

## **REFERENCES**

1. Efstratia N. Sgourou, Yerasimos Panayiotatos, Ruslan V. Vovk, Alexander Chroneos. Toward Defect Engineering Strategies to Optimize Energy and Electronic Materials. Review. Appl. Sci. 2017, 7, 674; doi: 10.3390/app7070674 2. A. Alkauskas, M. D. McCluskey, Chris G. Van de Walle. Tutorial: Defects in semiconductors—Combining experiment and theory. Journal of Applied Physics, 119(18), 181101, 2016 <https://doi.org/10.1063/1.4948245>
3. A. Chroneos, C. A. Londos, E. N. Sgourou, P. Pochet. Point defect engineering strategies to suppress A-center formation in silicon. Appl. Phys. Lett. 99, 241901 (2011); doi: 10.1063/1.3666226. View online: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3666226>
4. C. A. Londos, E. N. Sgourou, D. Hall, A. Chroneos. Vacancy-oxygen defects in silicon: the impact of isovalent doping. J. Mater. Sci.: Mater Electron (2014) 25:2395–2410 <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-014-1947-6>
5. Kritskaya T. V. Sovremennye tendentsii polucheniya kremniya dlya ustroystv elektroniki: monografiya / T. V. Kritskaya; Zaporozh. gos. inzhener. akad. - Zaporozhe: ZGIA, 2013. – 353 c.
6. Byitkin S.V., Kritskaya T.V. Modelirovanie S-obraznogo protsessa nakopleniya A- i Et-sentrov v izovalentno legirovannom germanium kremnii v srede Statistica i MathCAD. «Suchasni problemi metalurgIYi», # 21, vypusk 1- 2018. S. 29-35
7. Radiatsionnye effekty v integralnyih mikroschemah i metodyi ispytaniy izdeliy poluprovodnikovoy elektroniki na radiatsionnyu stoykost [Uchebn. pos. po distsipl. «Radiatsionnaya stoykost izdeliy elektronnoy tekhniki»] / E.N. Vologdin, A.P. Lyisenko. - M.: Nauchno-obrazovatelnyiy tsentr Moskovskogo regiona v oblasti fundamentalnyih problem radiatsionnoy fiziki tverdogo tela i radiatsionnogo materialovedeniya. Moskovskiy gosudarstvennyiy institut elektroniki i matematiki. -2002. - 46 s.
8. S. Bytkin. Use of germanium doped silicon (n-SiGe) for manufacturing radiation hardened devices and integrated circuits. Conference Paper. October 1997. DOI: 10.1109/RADECS.1997.698872. Conference: Radiation and Its Effects on Components and Systems, 1997. RADECS 97. Fourth European Conference on)
9. Kritskaya T.V. Upravlenie svoystvami i razrabotka promyishlennoy tehnologii monokristallicheskogo kremniya dlya elektroniki i solnechnoy energetiki: diss. doktora tehn. nauk: 05.16.03 / Kritskaya Tatyana Vladimirovna. – Zaporozhe, 2006. – 375 s. 10. Troyan P.E. Mikroelektronika: Uchebnoe posobie. – Tomsk: Tomskiy gosudarstvennyiy universitet sistem upravleniya i radioelektroniki, 2007. - 346 s.
11. Deystvie pronikayuschey radiatsii na izdeliya elektronnoy tekhniki / Pod red. E. A. Ladyigina. – M.: Sov. Radio, 1980. – 224 s. 12. Bytkin S.V. Konkurentnaya razvedka kon'yunkturno-tehnologicheskikh perspektiv traditsionnogo i high-tech eksporta Ukrayini: monografiya / Bytkin S.V.; ZaporIz. derzh. Inzh. akad. – ZaporIzhzhya: ZDIA, 2017. – 276s.

13. Bytkin S.V., Kritskaya T.V., Radin E.G., Goncharov V.I., Kunitskiy Yu.I., Kobeleva S.P. Eksperimentalnoe issledovanie harakteristik tiristorov, izgotovlennyih na Si<Ge>, pri deystvii gamma-oblucheniya. Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Materialyi elektronnoy tehniki. #3, 2012, str. 45-48.
14. Bytkin S.V., Kritskaya T.V., Kobeleva S.P. Statisticheskiy analiz vliyaniya Ge na radiatsionnuyu i termicheskuyu stabilnost elektrofizicheskikh harakteristik pribornyyih n-p-n-p-struktur na osnove CZ-Si <P, Ge>. Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Materialyi elektronnoy tehniki. # 4, 2013, str. 42-48.
15. Bytkin S. V., Kritskaya T.V. Modelirovanie protsessa nakopleniya radiatsionnyih defektov v protsesse oblucheniya monokristallov Si<P>i Si <P, Ge>. // MetalurgIya. Zbirnik naukovih prats ZaporIzkoYi derzhavnoYi InzhenernoYi akademIYi, vip.1(21). ZaporIzhzhya, 2010, stor.116-125.