

УДК 621.385

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ MATHCAD ЗАВИСИМОСТИ РАДИАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛАНАРНЫХ КРЕМНИЕВЫХ n-p-n СТРУКТУР ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ИЗОВАЛЕНТНОЙ ПРИМЕСИ(GE) И ДОЗЫ А-ОБЛУЧЕНИЯ

Быткин С.В.¹⁾, к.т.н, доцент, Критская Т.В.²⁾, д.т.н., профкссор

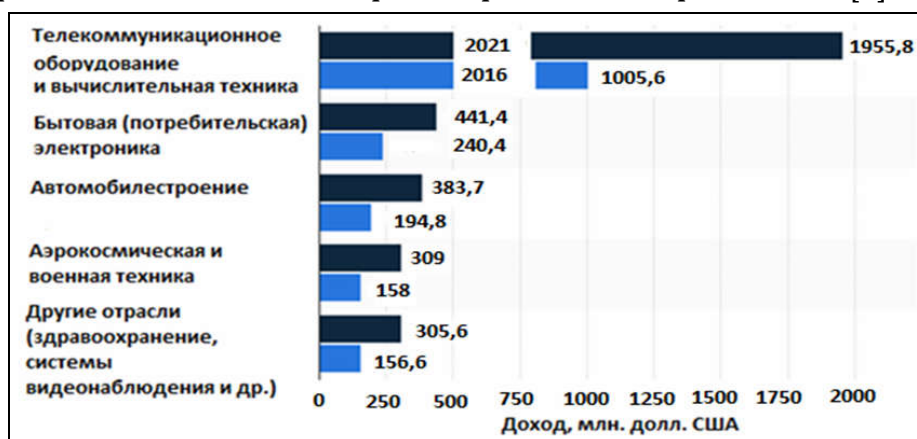
¹⁾ начальник отдела, ПАО «Запорожсталь», г. Запорожье

²⁾ заведующая кафедрой, Инженерный институт ЗНУ, г. Запорожье

Аннотация. Показано, что влияние уровня изовалентного легирования германием на радиационную стойкость n-p-n структур нелинейно. Существует уровень легирования ($N_{Ge} \cong 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$), при котором радиационная чувствительность n-p-n структур K_{h2IE} существенно возрастает. Получена и визуализирована феноменологическая модель $K_{h2IE} = f(N_{Ge}, \Phi_a)$.

Ключевые слова: РАДИАЦИОННАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ, ИЗОВАЛЕНТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ, ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

Постановка проблемы в общем виде. Ожидается, что рынок изовалентно легированного германием кремния и приборов на его основе (silicon germanium materials & devices market) достигнет \cong \$5млрд. к 2021г.[1]. Активизация процессов коммерциализации SiGe, основного конкурента GaAs, связывается с уникальностью физических свойств материалов в сочетании с экономической эффективностью его применения, что создаёт возможность изготовления приборов для передачи массивов данных в беспроводных системах связи (включая военную и аэрокосмическую технику), 5G сетях, IoT, и растущим спросом автомобилестроительной промышленности на интеллектуальные датчики и радары автоматизированных систем управления, включая системы избежания столкновений. Структура прогнозируемого роста дохода в различных сегментах мирового рынка SiGe приведена в [2]:



Данные отражают противоречивость проведенного анализа, не содержащего, по крайней мере в явном виде, никаких данных о возможности применения SiGe для производства дискретных маломощных и силовых приборов. Аналогичная точка зрения приведена в [3]:

Типы изделий		GaAs	Si	SiC	GaN	SiGe
СВЧ	Транзисторы	+, до 70 ГГц	+, до 6 ГГц	+, до 8 ГГц	+, до 110 ГГц	+, до 10 ГГц
	Диоды	+	+	+	+	+
	ИС	+	+	-	+	+
Силовая электроника	Транзисторы	-	+	+	+	-
	Диоды	-	+	+	+	-
	Модули	-	+	+	+	-
	Драйверы	-	+	-	+	-
СБИС		-	+	-	+	+
Светодиоды		-	-	-	+	-
МЭМС		-	+	-	+	-
Солнечные элементы		+	+	-	-	-
Радиационно-стойкие ИЭТ		+	+	+	+	+

Следовательно, возможность применения SiGe для производства элементной базы силовой электроники изучена недостаточно, что определяет необходимость дополнительных исследований этого материала.

Анализ последних исследований и публикаций. Показано, что именно SiGe является перспективным материалом для силовой электроники [4], который имеет возможность вытеснить традиционный кремний за счёт более удачного сочетания физических свойств изготавливаемых с его использованием приборов. В обозримом будущем рынок СПП будет продолжать сохранять многообразие конструктивно-технологических решений и материалов, применяемых для изготовления ИЭТ различного назначения, что позволит SiGe занять «ниши» для изготовления элементной базы мощного электропривода промышленного и транспортного назначения [5]. Для решения этой проблемы принципиально важно показать возможность повышения радиационной стойкости SiGe не только как материала [6], но и приборных структур на его основе, прежде всего в наземных условиях [7].

Выделение нерешенных научно-технических задач

Основной проблемой является радиационная чувствительность K_{h21E} при структур, изготовленных на SiGe n-типа, нелинейно зависящая от концентрации Ge и дозы облучения [8], что создаёт сложности при проектировании технологии приборов. Выбор приемлемой с технологической

точки зрения концентрации изовалентной примеси при применении двумерных графиков недостаточно нагляден.

Целью настоящей работы является методика визуального отображения зависимости радиационной чувствительности планарных pnp структур от концентрации изовалентной примеси и дозы облучения с применением MathCAD для выбора оптимального, с технологической точки зрения, уровня легирования германием исходных пластин для изготовления pnp структур.

Изложение основного материала

Экспериментальные и расчётные данные могут быть обработаны с использованием программы MathCAD следующей методике.

1. Полученные данные представляются в MathCAD в виде матрицы:

	1	2	3
1	$1 \cdot 10^{10}$	0	$1.002 \cdot 10^{-13}$
2	$1 \cdot 10^{11}$	0	$5.71 \cdot 10^{-14}$
3	$1 \cdot 10^{12}$	0	$3.254 \cdot 10^{-14}$
4	$1 \cdot 10^{13}$	0	$1.855 \cdot 10^{-14}$
5	$1 \cdot 10^{14}$	0	$1.057 \cdot 10^{-14}$
6	$1 \cdot 10^{10}$	$1.3 \cdot 10^{19}$	$4.186 \cdot 10^{-14}$
7	$1 \cdot 10^{11}$	$1.3 \cdot 10^{19}$	$5.844 \cdot 10^{-14}$
8	$1 \cdot 10^{12}$	$1.3 \cdot 10^{19}$	$8.16 \cdot 10^{-14}$
9	$1 \cdot 10^{13}$	$1.3 \cdot 10^{19}$	$1.139 \cdot 10^{-13}$
10	$1 \cdot 10^{14}$	$1.3 \cdot 10^{19}$	$1.59 \cdot 10^{-13}$
11	$1 \cdot 10^{10}$	$7.5 \cdot 10^{19}$	$4.031 \cdot 10^{-14}$
12	$1 \cdot 10^{11}$	$7.5 \cdot 10^{19}$	$2.635 \cdot 10^{-14}$
13	$1 \cdot 10^{12}$	$7.5 \cdot 10^{19}$	$1.722 \cdot 10^{-14}$
14	$1 \cdot 10^{13}$	$7.5 \cdot 10^{19}$	$1.126 \cdot 10^{-14}$
15	$1 \cdot 10^{14}$	$7.5 \cdot 10^{19}$...

2. Листинг последовательности команд обработки данных имеет вид:

```
ZGe0 := submatrix(XYZ, 1, 5, 3, 3)      MXY0 := submatrix(XYZ, 1, 5, 1, 2)
XGe0 := submatrix(XYZ, 1, 5, 1, 1)
YGe0 := submatrix(XYZ, 1, 5, 2, 2)      MXY11019 := submatrix(XYZ, 6, 10, 1, 2)

ZGe11019 := submatrix(XYZ, 6, 10, 3, 3)
XGe11019 := submatrix(XYZ, 6, 10, 1, 1)
YGe11019 := submatrix(XYZ, 6, 10, 2, 2)
```

```

k := 1
nx := 15 ny := 15
AregNGe0 := regress(MXY0, ZGe0, k)
f0(x, y) := interp[AregNGe0, MXY0, ZGe0, (x, y)]
zNGe0(x, y) := f0(x, y)
a0 := min(XGe0) b0 := max(XGe0) c0 := min(YGe0) d0 := max(YGe0)
ZGe0 := CreateMesh(f0, a0, b0, c0, d0, nx, ny)
    
```

```

AregNGe11019 := regress(MXY11019, ZGe11019, k)
f11019(x, y) := interp[AregNGe11019, MXY11019, ZGe11019, (x, y)]
zNGe11019(x, y) := f11019(x, y)
a11019 := min(XGe11019) b11019 := max(XGe11019)
c11019 := min(YGe11019) d11019 := max(YGe11019)
ZGe11019 := CreateMesh(f11019, a11019, b11019, c11019, d11019, nx, ny)
    
```

Зависимость K_{h21E} для прп структуры с широкой ($\geq 0,35$ мкм) базой от содержания изовалентной легирующей примеси и дозы α -облучения наглядно может быть представлена в виде зависимости, приведенной на рис.1:

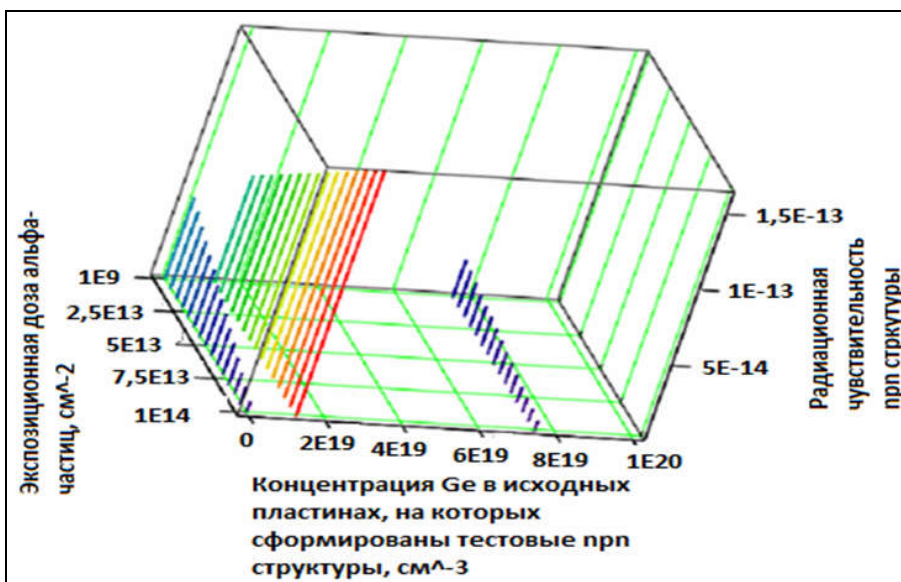


Рисунок 1 – Различные закономерности изменения радиационной чувствительности K_{h21E} для прп структур, изготовленных на кремнии с различным содержанием Ge

Используя относительно простой алгоритм возможно получение зависимости K_{h21E} от содержания изовалентной легирующей примеси и дозы α -облучения в виде поверхности (рис.2):

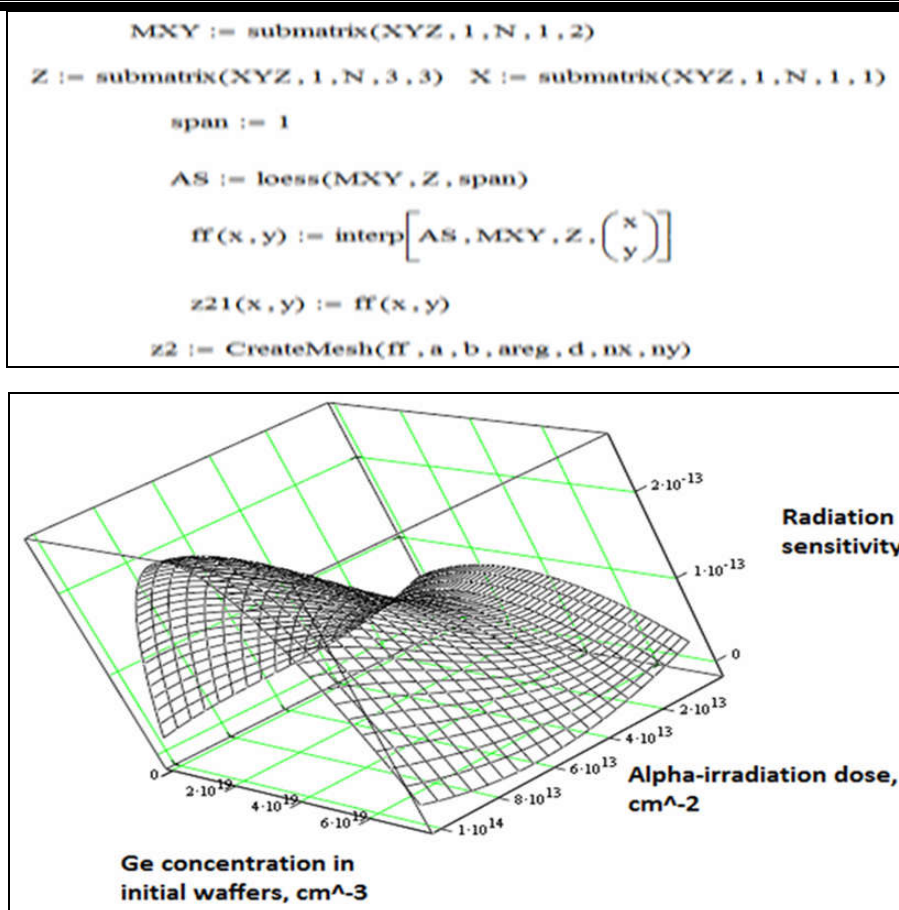


Рисунок 2 – Стимулирование радиационной чувствительности при структуре относительно малой концентрации ($\approx 2 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$) Ge при α -облучении

Полученные зависимости качественно могут быть объяснены с использованием схемы дефектообразования, предложенной в [9]. При облучении SiGe образуется устойчивый кластер GeVO, уменьшающий концентрацию вакансий в облучаемом материале и, как следствие, концентрацию радиационных дефектов. Эффективность процесса формирования стока для вакансий достигается за счёт коррелированного распределения германия и кислорода, приводящего к более полной компенсации внутренних упругих напряжений в кремнии [10]. Сток вакансий уменьшает вероятность образования А- и Е-центров в SiGe по сравнению с контрольным Si (т.е. с $N_{\text{Ge}} = 0$). После насыщения комплекса Ge-O вакансиями, активизируется процесс образования А-центров вплоть до исчерпания O_v в ходе квазихимической реакции. Фактически, увеличение вероятности образования А-центров связано с взаимодействием междоузельного кислорода, окружающего атомы Ge, с вводимыми в материал облучением вакансиями. При

большой концентрации германия ($N_{Ge} \geq 7,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) вероятность образования комплексов V-O (А-центров) (и, естественно, K_{h21E}) в изовалентно легированном Si существенно ниже, чем в контрольном материале. При $N_{Ge} \cong 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ концентрации. Ge достаточно для образования «атмосферы» из O_i , но процесс образования комплекса GeVO из-за небольшой концентрации изовалентной примеси завершается задолго до исчерпания концентрации кислорода вокруг атомов германия. Это стимулирует образование А-центров, что, в свою очередь, вызывает увеличение K_{h21E} . Процесс более выражен при высоких дозах облучения.

Выводы из проведенного исследования и перспективы дальнейшего поиска.

1. Влияние уровня изовалентного легирования германием на радиационную стойкость при структур нелинейно. Существует уровень легирования ($N_{Ge} \cong 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$), при котором радиационная чувствительность K_{h21E} существенно возрастает.

2. Получена и визуализирована феноменологическая модель $K_{h21E} = f(N_{Ge}, \Phi_a)$. Необходимо построение расчётно-аналитической модели влияния Ge на радиационную стойкость планарных структур с широкой ($\geq 0,35$ мкм) базой.

Литература

1. Global Silicon Germanium Materials & Devices Market - Analysis & Forecast 2017-2021. ASDReports.com / ASDMedia BV - Veemkade 356 - 1019HD Amsterdam - The Netherlands. Publish date: April 2018. Report code: ASDR-451107. Pages: 231. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.asdreports.com/news-28726/global-silicon-germanium-materials-devices-market-anticipated-reach-50453-m-2021>
2. Revenue of the silicon germanium materials and devices market worldwide in 2016 and 2021, by end-user (in million U.S. dollars). Сайт statista.[Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.statista.com/statistics/911545/global-silicon-germanium-materials-and-devices-market-revenue-by-end-user/>
3. Д. Боднарь. Полупроводниковая микроэлектроника – 2018 г. «Электронные компоненты», № 1, 2019. С. 12-17.
4. Критская, Т. В. Перспективные полупроводниковые материалы для использования в силовой электронике / Т. В.Критская, С. В. Быткин // Вестник НТУ «ХПИ», Серия:

Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ«ХПИ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 148-161. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.21.

5. Быткин С.В., Критская Т.В. Кремний, легированный германием, как альтернатива конкурентоспособности силовых полупроводниковых приборов. *Металургія. Збірник наукових праць Запорізької державної інженерної академії*, вип. 2(27). Запоріжжя, ЗДІА, 2012, стор.124-131.

6. Быткин, С., & Критская, Т. (2019). Вплив ізовалентного легування Si германієм на ймовірність утворення домішково-дефектних комплексів у базі p+n структур при опроміненні α -частинками. *Журнал фізики та інженерії поверхні*, 3(2), 57-67. Retrieved із <https://periodicals.karazin.ua/pse/article/view/13665>

7. Быткин С. В. Кремний, легированный германием (SiGe), как материал для изготовления силовых полупроводниковых приборов, устойчивых к действию вторичного космического излучения / С. В. Быткин, Т. В. Критская // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion* : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2019. – № 20 (1345). – С. 102-109.

8. Быткин С.В., Критская Т.В. Радиационная чувствительность планарных pnp структур, изготовленных на изовалентно легированном германием кремнии (nSiGe). *СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті. № 22, (2019). С. 13-21. – Дніпро: НМетАУ – ІВК «Системні технології», 2019. – 141с.*

9. С.А. Londos, E. N. Sgourou, A. Chroneos, V. V. Emtsev. Carbon, oxygen and intrinsic defect interactions in germanium-doped silicon. *Semicond. Sci. Technol.* 26(2011) 105024 (7pp) [Электронный ресурс] Режим доступа / Online at stacks.iop.org/SST/26/105024

10. Критская Т. В. Современные тенденции получения кремния для устройств электроники: монография / Т. В. Критская; Запорож. гос. инженер. акад. - Запорожье: ЗГИА, 2013. - 353 с.

References

1. Global Silicon Germanium Materials & Devices Market - Analysis & Forecast 2017-2021. ASDReports.com / ASDMedia BV - Veemkade 356 - 1019HD Amsterdam - The Netherlands. Publish date: April 2018. Report code: ASDR-451107. Pages: 231. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.asdreports.com/news-28726/global-silicon-germanium-materials-devices-market-anticipated-reach-50453-m-2021>

2. Revenue of the silicon germanium materials and devices market worldwide in 2016 and 2021, by end-user (in million U.S. dollars). Сайт statista.[Электронный ресурс] Режим

доступа: <https://www.statista.com/statistics/911545/global-silicon-germanium-materials-and-devices-market-revenue-by-end-user/>

3. D. Bodnar. Semiconductor microelectronics – 2018. "Electronic components", № 1, 2019. pp. 12-17.
4. Kritskaya, T. V., Bytkin, S. V. Perspective semiconductor materials for the using in the power electronics. Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. – Kharkiv:NTU"KhPI", 2018, 26(1302), 1, 148-161, doi:10.20998/2413-4295.2018.26.21.
5. Bytkin, S., Kritskaya, T. Silicon alloyed by a germanium, as alternative of competitiveness of power semiconductor devices. Metallurgy. Collection of scientific works of the Zaporizhzhya state engineering academy, iss. 2 (27). Zaporizhzhya, ZSEA, 2012, pp. 124-131.
6. Bytkin, S., & Kritskaya, T. (2019). 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. Journal of Surface Physics and Engineering, 3(2), 57-67. Retrieved from <https://periodicals.karazin.ua/pse/article/view/13665>
7. Bytkin, S., Kritskaya, T. Germanium-doped silicon (SiGe) as a material for the manufacture of power semiconductor devices resistant to secondary cosmic radiation. Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 20 (1345), 102–109, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.14.
8. Bytkin, S., Kritskaya, T. Radiation sensitivity of the planar npn structures made on the isovalently alloyed by Germanium silicon (nSiGe). MODERN PROBLEMS OF METALLURGY. Scientific news. № 22 (2019). Pp. 13-21. Dnepr: NMetAU.
9. C.A. Londos, E. N. Sgourou, A. Chroneos, V. V. Emtsev. Carbon, oxygen and intrinsic defect interactions in germanium-doped silicon. Semicond. Sci. Technol. 26(2011) 105024 (7pp) [Электронный ресурс] Режим доступа / Online at stacks.iop.org/SST/26/105024
10. Kritskaya, T. Modern tendencies of silicon for the devices of electronics production: the monograph / Kritskaya, T. Zaporizhzhya State Engineering Academy. Zaporizhzhya: ZSIA, 2013. – 353 p.