

МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ SiGe ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТИРИСТОРІВ

Анотація. На силові напівпровідникові прилади (СНП) в наземних умовах діють високі потоки атмосферних нейтронів, що ставить завдання розробки та застосування кремнія із високою радіаційною стійкістю. Для підвищення їх радіаційної стійкості запропоновано застосування ізовалентно легованого германієм (Ge) монокристалічного кремнію (CZ-<Si,Ge>). Проведено моделювання експериментальних даних щодо придатних силових тиристорів загального призначення високовольтного класу типу T122, виготовлених за ідентичною технологією з застосуванням CZ-Si та CZ-<Ge>. Отримані результати для обґрунтованого вибору концентрації Ge. Показано, що при введенні в технологію цих приладів SiGe спостерігається немонотонна зміна частки тиристорів, що піддаються випробуванням на вихід придатних приладів високих (10, 11, 12) класів (величина імпульсної напруги, що повторюється, в закритому стані 1000, 1100 і 1200 В). Концентрація Ge, придатна для виготовлення високовольтних тиристорів, перебуває у інтервалі $2 \cdot 10^{19}$ - $1 \cdot 10^{20}$ см⁻³. Запропоновано виготовлення партії тиристорів T122 12 класу та проведення їх радіаційних випробувань із застосуванням (на першому етапі) γ-опромінення.

Ключові слова: атмосферні нейтрони, радіаційна стійкість, моделювання експериментальних даних, силові високовольтні тиристори T122, ідентична технологія, застосування CZ-Si та CZ-<Si,Ge>.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Природна радіаційна обстановка у різних регіонах світу різна, визначається їх географічним розташуванням (широтою та довготою, півкулею), висотою над рівнем моря та активністю Сонця [1]. Випробування щодо впливу потоків нейтронів зі спектром, подібним до атмосферного, проводяться згідно з міжнародним нормативним документом [2]. Інтегруючи в MathCAD рівняння диференціального потоку нейтронів для наземних умов (рівень моря), наведене в [2, с.56], отримуємо чисельне значення потоку, що використовується як довідкове значення для оцінки радіаційної обстановки, пов'язаної з атмосферними нейтронами у різних точках світу, $\varphi_n \sim 10^{-3}$ н·см⁻²·с⁻¹ [3]. Для того, щоб пояснити відмови СПП логічним є при-

пущення про те, що на обладнання в наземних умовах діють істотно вищі потоки нейтронів. Розрахункова залежність їх диференціального потоку від енергії наведена на рис. 1:

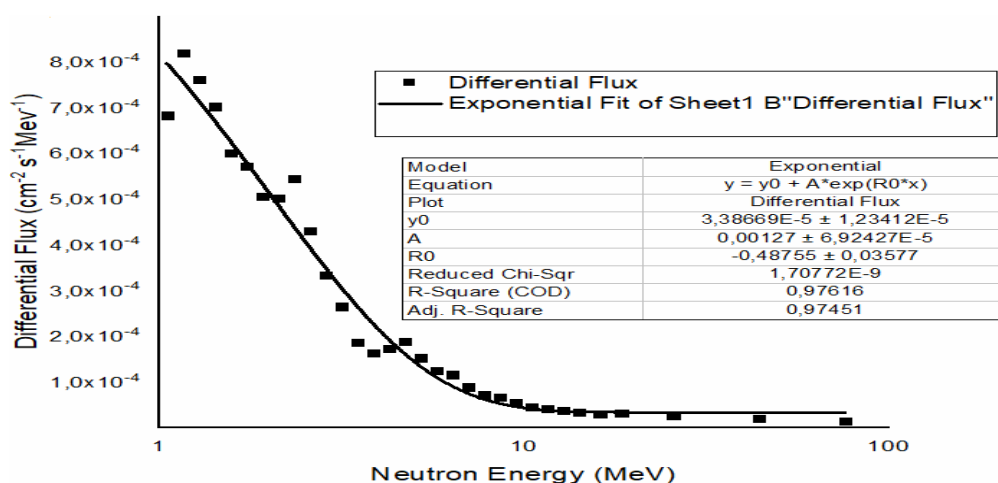


Рисунок 1 - Моделювання в OriginPRO експериментальних даних роботи [2] (розрахунок авторів)

Інтегрування в MathCAD апроксимуючої залежності, наведеної на рис.1, дає щільність потоку нейтронів [нейтрон·см⁻²с⁻¹]:

$$\Phi_n = \int_{1.054}^{1.5 \cdot 10^3} (3,38669 \cdot 10^{-5} + 0,00127 \cdot \exp(-0,48755 \cdot E)) \cdot dE = 5,08$$

За розрахунковий час експлуатації електроприводу у гірській місцевості (згідно [4], 60000 годин при повному навантаженні) його елементна база зазнає експозиційної дози опромінення $\sim 3 \cdot 10^{10}$, а цей показник для вітрогенераторів, що працюють на рівні моря, складе при роботі впродовж 24 годин протягом 20 років $\sim 3 \cdot 10^9$ нейтрон·см⁻², що ставить завдання розробки та застосування кремнія із високою радіаційною стійкістю у наземних умовах для виготовлення силових напівпровідникових приладів (СНП).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Створення кремнію для виготовлення радіаційно-стійких СНП є частиною глобальної проблеми розробки, виготовлення та застосування матеріалів, що зберігають свої фізичні властивості в умовах дії іонізуючих випромінювань [5]. Для підвищення радіаційної стійкості запропоновано застосування ізовалентно легованого германієм (Ge) кремнію. В основу такого підходу закладено "стратегії проектування дефектів" (defect engineering strategies). Для придушення концентрації А-центрів необхідні інженерні стратегії управління дефектоутворенням у матеріалі неоднорідних

активних структур мікроелектронних та дискретних пристроїв [6,7]. Взаємодія ізовалентних домішок, (Sn, Pb C, Ge), що позначаються D, з А-центрами, призводить до формування комплексів DVO по реакції $D + VO \rightarrow DVO$, стабільність яких вища порівняно з дефектами виду VO [8].

Виділення невирішених науково-технічних завдань. Раніше отримані результати, що підтверджують ефективність застосування ізовалентного легування германієм кремнію при радіаційних випробуваннях малопотужних (на струм ~ 100 мА) дискретних приладів [9]. Силові тиристори Т122-25 застосовуються для перетворення та регулювання постійного та змінного струму до 25А частотою до 500 Гц у ланцюгах з напругою 100В – 1600В (1-16 клас) [10]. Тип корпусу – ST (stud thyristor – штирьовий тиристор, різьблення - М6), маса – 11г. В data sheets прямо вказується, що ці прилади не можуть використовуватись у радіаційних полях [11]. Отже, основним практично важливим завданням є підтвердження технологічної ефективності застосування SiGe, тобто можливість використання радіаційно стійкого матеріалу для виготовлення високовольтних СНП.

Метою цієї роботи є моделювання отриманих експериментальних результатів для обґрунтованого вибору концентрації Ge для виготовлення високовольтних тиристорів Т122.

Виклад основного матеріалу. Використовуємо наведені в [12, с.156] дані про вихід придатних силових тиристорів загального призначення типу Т122, виготовлених за ідентичною технологією з застосуванням CZ-Si и CZ-Si<Ge>. При введенні в технологію цих приладів SiGe спостерігається немонотонна зміна частки тиристорів, що піддаються випробуванням на вихід придатних приладів високих (10, 11, 12) класів (величина імпульсної напруги, що повторюється, в закритому стані 1000, 1100 і 1200 В). Моделювання експериментальних результатів, наведених в MathCAD, рис. 2.

0	23	18	25
0	30	22	15
$5.6 \cdot 10^{18}$	3.2	22.2	66.7
$6.3 \cdot 10^{19}$	6	13.0	77
$1.1 \cdot 10^{20}$	0.8	8.3	79.5
$1.6 \cdot 10^{20}$	8.2	14.8	45.9

a)

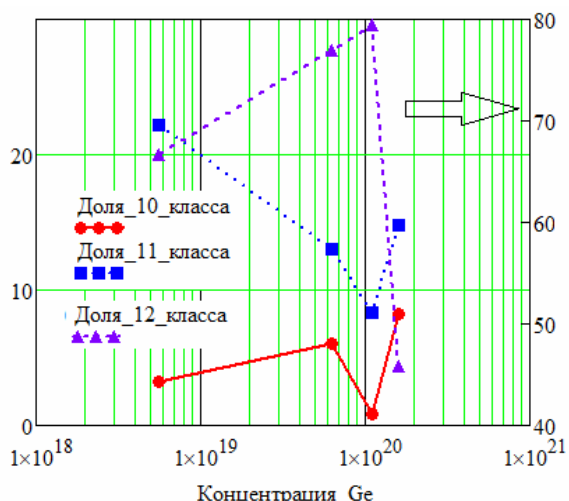
Доля_тиристоров_различных_классов :=

Концентрация_Ge := Доля_тиристоров_различных_классов^{<0>}

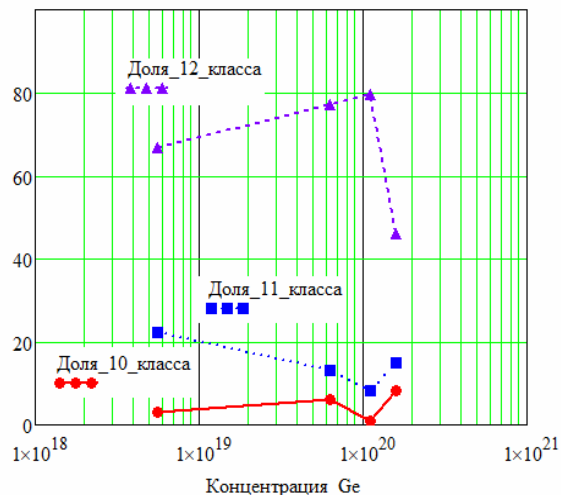
Доля_10_класса := Доля_тиристоров_различных_классов^{<1>}

Доля_11_класса := Доля_тиристоров_различных_классов^{<2>}

Доля_12_класса := Доля_тиристоров_различных_классов^{<3>}



б)



в)

Рисунок 2 – а) – результати вимірювань, % від кількості приладів у вибірці; б, в) збільшення і зниження частки високовольтних (клас 12) приладів Т122 за рахунок частки більш низьковольтних приладів (клас 10, 11), вираженої в % від вибірки при зміні концентрації Ge у вихідних пластинах кремнію

При застосуванні SiGe відбувається збільшення частки високовольтних приладів за рахунок зменшення частки менш високовольтних приладів. Іншими словами, відбувається *нелінійне* покращення якості Т122 у певному діапазоні концентрацій германію (приблизно $5 \cdot 10^{18}$ - $1 \cdot 10^{20}$ см⁻³). Для тиристорів 12 класу спостерігається складна залежність частки високовольтних приладів концентрації Ge, рис. 3.

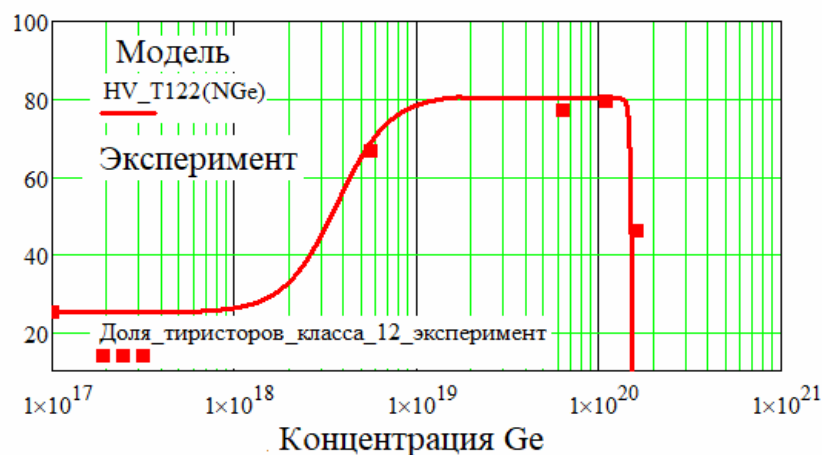
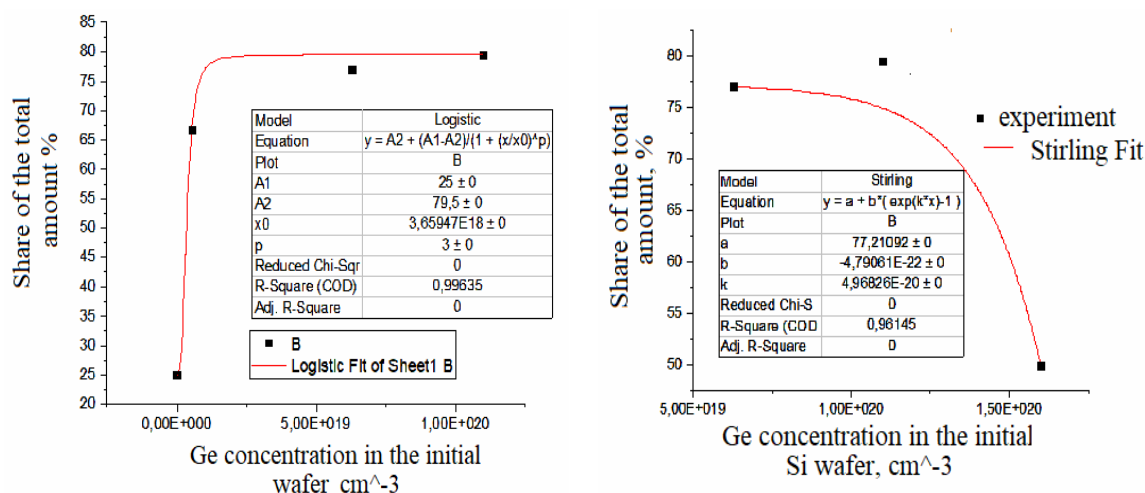


Рисунок 3 – Моделювання залежності частки тиристорів 12 класу при виготовленні тиристорів на кремнієвих пластинах з різним вмістом Ge

Використана така методика моделювання.

1. Експериментальні дані поділені на дві групи. Із застосуванням програми OriginPRO отримуємо залежність частки тиристорів 12 класу від концентрації Ge у вихідній пластині Si для кожної з підвибірок:



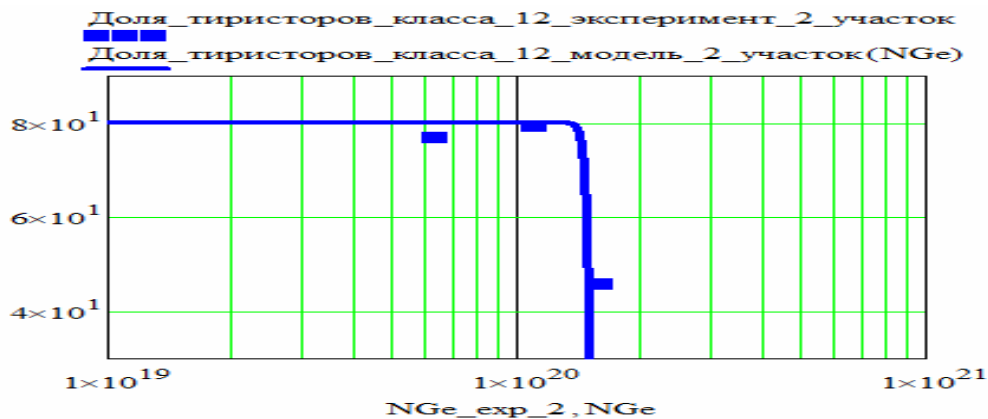
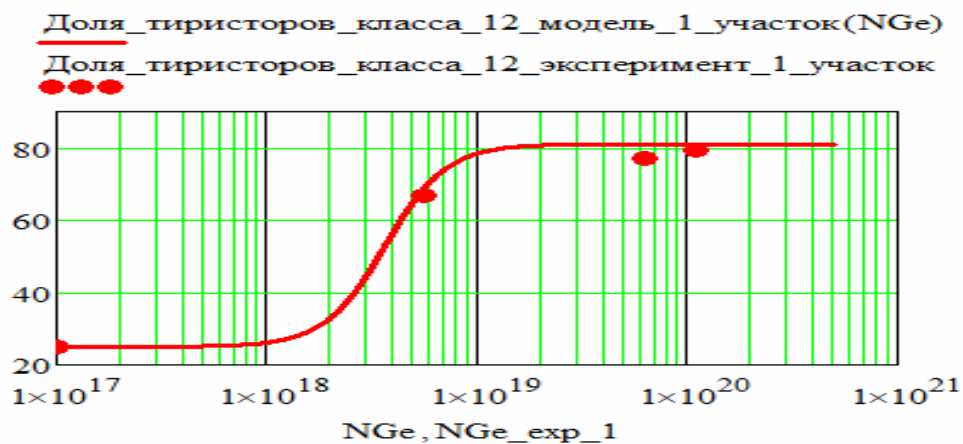
3. Порівнюємо апроксимуючі рівняння та експериментальні значення для кожної з ділянок:

$$A1 := 25 \quad A2 := 81$$

$$N_{Ge} := 0,5 \cdot 10^{15} \dots 5 \cdot 10^{20}$$

$$\text{Доля_тиристоров_класа_12_модель_1_участок}(N_{Ge}) := A2 + \frac{(A1 - A2)}{1 + \left(\frac{N_{Ge}}{3.65947 \times 10^{18}} \right)^3}$$

$$\text{Доля_тиристоров_класа_12_модель_2_участок}(N_{Ge}) := 80.1 + \left[-4.79061 \cdot 10^{-22} \cdot \left(\exp(3.5 \cdot 10^{-19} \cdot N_{Ge}) - 1 \right) \right]$$



4. Об'єднуємо рівняння з використанням простої програми в MathCAD:

$$HV_T122(N_{Ge}) := \begin{cases} \text{Доля_тиристоров_класа_12_модель_1_участок}(N_{Ge}) & \text{if } 10^{17} \leq N_{Ge} \leq 2.1 \cdot 10^{19} \\ \text{Доля_тиристоров_класа_12_модель_2_участок}(N_{Ge}) & \text{if } 1.75 \cdot 10^{19} \leq N_{Ge} \leq 2 \cdot 10^{20} \end{cases}$$

Висновки з проведеного дослідження та перспективи подальшого пошуку. Концентрація Ge, придатна для виготовлення високовольтних тиристорів, перебуває у інтервалі $2 \cdot 10^{19} - 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, тобто на *лінійній* ділянці залежності. У роботі [13] експериментально показана можливість та механізм підвищення радіаційної стійкості SiGe з концентрацією Ge $\cong 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ обґрунтовано дозволяє. Це припустити можливість досягнення радіаційної стійкості високовольтних силових дискретних тиристорів при їх опроміненні γ -квантами в діапазоні доз до $\cong 3 \cdot 10^6 \text{ мЗв}$, як це вже було нами з'ясовано при опроміненні тиристорів малої потужності [14]. Отже, необхідно виготовлення партії тиристорів T122 12 класу та проведення їх радіаційних випробувань із застосуванням (на першому етапі) γ -опромінення.

ЛІТЕРАТУРА

1. В.М. Владимиров, Л.В. Границкий, Н.Н. Гурова, А.В. Салагаева, Р.Г. Хлебопрос. Планетарное распределение вторичных нейтронов. Сайт «Современные проблемы». [Электронный ресурс] Режим доступа / <http://modernproblems.org.ru/ecology/14-hlebopros3.html>
2. Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices. JEDEC STANDARD JESD89A (Revision of JESD89, August 2001) OCTOBER 2006 JEDEC SOLID STATE TECHNOLOGY ASSOCIATION.
3. 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 // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 102-109. – doi: 10.20998/2409-9295.2019.20.14.
4. H. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg et al. Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, p.p. 1-18.
5. Efstratia N. Sgourou, Yerasimos Panayiotatos, Ruslan V. Vovk, Alexander Chrones. Toward Defect Engineering Strategies to Optimize Energy and Electronic Materials. Review. Appl. Sci. 2017, 7, 674; doi:10.3390/app7070674
6. A. Chrones, 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>

7. 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>
8. Christopoulos, S-R.G., Parfitt, D., Sgourou, E. N., Londos, C. A., Vovk, R. V., Chroneos, A. (2016) Controlling A-center concentration in silicon through isovalent doping: Mass action analysis. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, volume 27 (5): 4385-4391 <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-016-4308-9>
9. S. V. Bytkin, T. V. Kritskaya, S. P. Kobeleva. Statistical analysis of germanium influence on radiation and thermal stability of the n-p-n-p device structures based on CZ-Si <P, Ge> electrophysical properties. Russian Microelectronics, December 2014, Volume 43, Issue 8, pp. 546–551
10. Тиристор силовой T122-25 – АС Энергия. [Электронный ресурс] / Режим доступа: // <https://asenergi.com/catalog/tiristory-silovye/t122/t122-25.html#more>
11. T122-20, T122-25, T122-32 – Тиристоры. [Электронный ресурс] / Режим доступа: // <https://npp-tp.ru/products/electrical/silovaya-elektronika/tiristoryi/tiristoryi-nizkochastotnyie/tiristoryi-t122-20,-t122-25,-t122-32.html>
12. 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.
13. Быткин С.В., Критская Т.В. Особенности свойств полупроводниковых материалов для использования в силовых полупроводниковых приборах. Материалы международной научной конференции «АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ», 24-25 мая 2018. Сумгаитский госуниверситет, г. Сумгаит, Азербайджан. С. 438- 443.
14. Быткин С.В., Критская Т.В., Радин Е.Г., Гончаров В.И., Куницкий Ю.И., Кобелева С.П. Экспериментальное исследование характеристик тиристорov, изготовленных на Si<Ge>, при действии гамма-облучения. Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. №3, 2012, стр. 45-48.

REFERENCES

1. V.M. Vladimirov, L.V. Granitsky, N.N. Gurova, A.V. Salagaeva, R.G. Khlebopros. Planetary distribution of secondary neutrons. Site "Modern problems". [Electronic resource] Access mode /<http://modernproblems.org.ru/ecology/14-hlebopros3.html>

2. Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices. JEDEC STANDARD JESD89A (Revision of JESD89, August 2001) OCTOBER 2006 JEDEC SOLID STATE TECHNOLOGY ASSOCIATION.
3. 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.
4. H. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg et al. Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, p.p. 1-18.
5. Efstratia N. Sgourou, Yerasimos Panayiotatos, Ruslan V. Vovk, Alexander Chronos. Toward Defect Engineering Strategies to Optimize Energy and Electronic Materials. Review. Appl. Sci. 2017, 7, 674; doi:10.3390/app7070674
6. A. Chronos, 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>
7. C. A. Londos, E. N. Sgourou, D. Hall, A. Chronos. 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>
8. Christopoulos, S-R.G., Parfitt, D., Sgourou, E. N., Londos, C. A., Vovk, R. V., Chronos, A. (2016) Controlling A-center concentration in silicon through isovalent doping: Mass action analysis. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, volume 27 (5): 4385-4391 <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-016-4308-9>
9. S. V. Bytkin, T. V. Kritskaya, S. P. Kobeleva. Statistical analysis of germanium influence on radiation and thermal stability of the n-p-n-p device structures based on CZ-Si <P, Ge> electrophysical properties. Russian Microelectronics, December 2014, Volume 43, Issue 8, pp. 546–551
10. Power Thyristor T122-25. [Electronic resource] Access mode: <https://asenergi.com/catalog/tiristory-silovye/t122/t122-25.html#more>
11. T122-20, T122-25, T122-32 – Thyristors. [Electronic resource] Access mode: <https://npp-tp.ru/products/electrical/silovaya-elektronika/tiristoryi/tiristoryi-nizkochastotnyie/tiristoryi-t122-20,-t122-25,-t122-32.html>
12. 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.

13. Bytkin S.V., Kritskaya T.V. Features of the properties of semiconductor materials for use in power semiconductor devices. Materials of the international scientific conference "TOPICAL ISSUES OF APPLIED PHYSICS AND ENERGY", May 24-25, 2018. Sumgait State University, Sumgait, Azerbaijan. Pp. 438-443.

14. Bytkin S.V., Kritskaya T.V., Radin E.G., Goncharov V.I., Kunitsky Yu.I., Kobeleva S.P. Experimental study of the characteristics of thyristors fabricated on Si<Ge> under the action of gamma irradiation. Proceedings of Universities. Materials of electronic engineering. No. 3, 2012, pp. 45-48.

Received 15.03.2022.

Accepted 17.03.2022.

Simulation of the SiGe use efficiency for the production of high-voltage thyristors

Power semiconductor devices often subjected to appreciable terrestrial atmospheric neutron flows. For the improvement of their radiation hardness, the use of silicon doped with Ge (SiGe) was proposed. The stability of last is much higher in comparison with convenient type silicon. Earlier received results confirmed effectiveness of isovalent doping of silicon with germanium at radiation tests of low power (current approx. 100 mA) discrete devices. Power thyristors T122-25 are used for the transformation and regulation of AC and DC current up to 25A, frequency up to 500 Гц in the circuits with voltage 100 – 1600V (1-16 class). In the data sheets directly indicated that these devices are not suitable for operating in the conditions of ionizing radiation. Therefore, the main practically important mission of the article was the confirmation the technological efficiency of SiGe use, or, in other words, possibility of radiation hard material use for high voltage power devices technology. The purpose of the present work was the modeling of the experimental findings for the informed choice of Ge concentration for manufacturing of high voltage thyristors T122. The data concern the workable general-purpose power thyristors T122 type yield, manufactured in accordance with the identical technology, based on CZ-Si u CZ-Si<Ge>. At SiGe implementation in the technology of power semiconductors was observed no monotonic change of the thyristors gain share for devices of high (10, 11, 12) ranges (classes), the value of pulse recurring voltage in off-state is 1000, 1100 and 1200 V. Simulation of the experimental results was performed in MathCAD. The concentration of Ge, suitable for the manufacture of high-voltage thyristors, is in the range $2 \cdot 10^{19}$ - $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, i.e. in the linear region of dependence. Previously, the authors have experimentally shown the possibility and mechanism of increasing the radiation resistance of SiGe with a concentration of $\text{Ge} \cong 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. It is allowed to admit the possibility of reaching the radiation resistance of high-voltage power discrete thyristors when tested with γ -quanta in the dose range up to $\cong 3 \cdot 10^6 \text{ mSv}$.

Биткін Сергій Віталійович - к.т.н., доцент кафедри мікроелектронних та електронних інформаційних систем Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету.

Критська Тетяна Володимирівна – д.т.н., професор, завідувачка кафедри мікроелектронних та електронних інформаційних систем Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету.

Bitkin Sergiy Vitaliovich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Candidate of the Department of Microelectronic and Electronic Information Systems of the Engineering Scientific and Scientific Institute named after A.I. Yu.M. Potebny Zaporozhye National University.

Kritska Tetyana Vladimirovna - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Microelectronic and Electronic Information Systems of the Engineering Scientific Institute named after. Yu.M. Potebny Zaporozhye National University.