

КРЕМНИЙ, ЛЕГИРОВАННЫЙ ГЕРМАНИЕМ (SIGE), КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ, УСТОЙЧИВЫХ К ДЕЙСТВИЮ ВТОРИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С. В. БЫТКИН¹, Т. В. КРИТСКАЯ²

¹отдел конъюнктурно-технологического системного анализа ПАО «Запорожсталь», г. Запорожье, Украина

²кафедра электронных систем, Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина
e-mail: bytkin@bigmir.net; krytskaja2017@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Проблема непредсказуемого выхода из строя силовых полупроводниковых приборов может быть решена при использовании технологий, обеспечивающих повышение их радиационной стойкости. Использование монокристаллов кремния, легированных германием, замедляет деградацию характеристик приборов при воздействии ионизирующих излучений, что является альтернативой дефицитным и дорогостоящим GaAs, GaN, SiC, применяемым для этих целей. Воздействие вторичного космического излучения может быть ответственным за деградацию электрофизических параметров монокристаллов кремния при их длительном хранении, а также за снижение эффективности работы полупроводниковых преобразователей солнечной энергии.

Ключевые слова: кремний, легированный германием; силовой полупроводниковый прибор; пробой p-n-перехода; вторичное космическое излучение

GERMANIUM-DOPED SILICON (SIGE) AS A MATERIAL FOR THE MANUFACTURE OF POWER SEMICONDUCTOR DEVICES RESISTANT TO SECONDARY COSMIC RADIATION

S. BYTKIN¹, T. KRITSKAYA²

¹Department of Market Technological System Analysis of PJSC Zaporizhstal, Zaporizhia, Ukraine

²Department of Electronic Systems, Zaporizhzhya State Engineering Academy, Zaporizhia, Ukraine

ABSTRACT. The problem of unpredictable failure of power semiconductor devices can be solved by using technologies that increase their radiation resistance. The use of single crystals of germanium doped silicon slows down the degradation of the characteristics of devices when exposed to ionizing radiation, which is an alternative to scarce and expensive GaAs, GaN, SiC, used for these purposes. The impact of secondary cosmic radiation may be responsible for the degradation of the electrophysical parameters of silicon single crystals during their long-term storage, as well as for the decrease in the operating efficiency of semiconductor solar energy converters.

Keywords: silicon doped with germanium; power semiconductor device; p-n junction breakdown; secondary cosmic radiation

Введение

Экспорт высокотехнологичных (high-tech) полупроводниковых материалов, к которым предъявляются исключительно высокие требования в отношении их физико-технологических свойств – естественный и эффективный путь диверсификации экспорта, совершенствования международной специализации Украины [1]. На мировом рынке вероятны эффективные продажи если и не уникальных, то и не широко представленных, товаров и услуг, например, это может быть кремний, легированный изовалентной примесью германия с высокой радиационной стойкостью [2].

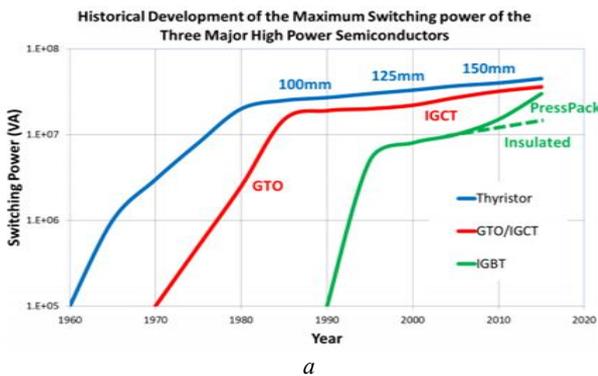
Фактически, это экспорт результатов НИОКР в форме работоспособных изделий, материалов и/или технологий их производства и уникальных научно-технологических услуг. Кремний с высокой термической и радиационной стойкостью может поставляться

на рынки стран, где пока нет индустриальных стандартов, под которыми можно понимать наличие хорошо изученных технологий. Эффективность технологического применения поставляемого на мировой рынок материала со специальными свойствами должна быть доказана экспериментально. На примере стран Северной Европы обоснована эффективность перехода к «нишевой» специализации экономик с относительно небольшим внутренним рынком как ответ на вызовы глобальной конкуренции [3]. К «нишевому» экспортному товару, в том числе полупроводниковому материалу, должны предъявляться требования сочетания относительной технологической простоты с наличием физико-технических характеристик, позволяющих его использовать для решения задач, принципиально не решаемых стандартными материалами, например, обеспечение высокой радиационной стойкости силовых полупроводниковых приборов.

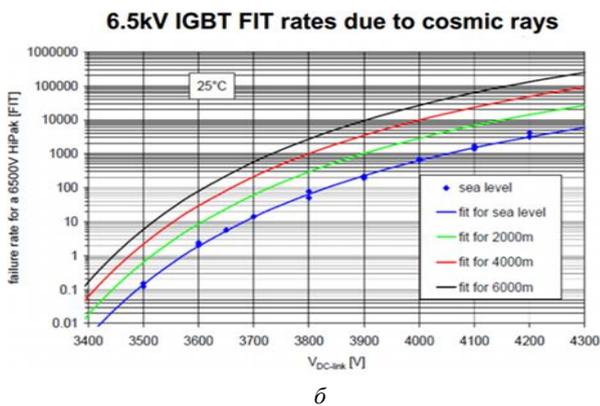
©С. В. Быткин, Т. В. Критская, 2019

Анализ состояния вопроса

Возникает закономерный вопрос о необходимости и целесообразности применения изделий электронной техники (ИЭТ) с высокой радиационной стойкостью для преобразовательной техники гражданского промышленного назначения. Необходимость обеспечения радиационной стойкости Si для изготовления многослойных структур силовых приборов электропривода общепромышленного оборота и транспортного электропривода в наземных условиях определяется общим трендом развития преобразовательной техники, в частности, проявлением насыщения увеличения максимальной переключаемой мощности (рабочего напряжения и тока) силовых ИЭТ [4], (рис. 1, а), что определяется, в том числе, ростом количества отказов высоковольтных силовых приборов при их эксплуатации на высотах, существенно превышающих уровень моря, вследствие действия вторичных космических лучей, образовавшихся в атмосфере (рис. 1, б):



а

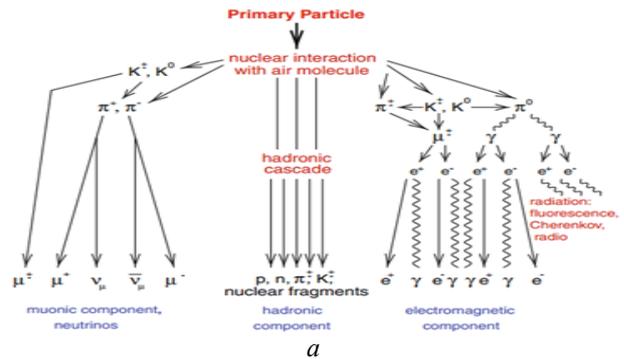


б

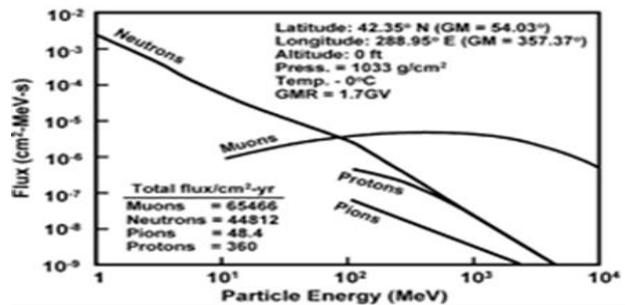
Рис. 1 - Радиационная стойкость силовых полупроводниковых приборов к вторичному космическому излучению в наземных условиях как определяющий фактор их перспективного развития с точки зрения увеличения мощности ИЭТ [4]

В работе [5] приведена схема образования высокоэнергетических частиц (рис. 2, а), бомбардировка которыми кристаллов силовых полупроводниковых приборов (СПП) вызывает отказ многослойных структур; в [6] приведены энергетические характери-

стики атмосферных элементарных частиц, преобладающих в их каскаде (particleshower) (рис.3, б):



а



б

Рис. 2 - Механизм образования и, как пример, характеристики каскада высокоэнергетических частиц, воздействующих на СПП наземного (промышленного) применения (для определённого уровня моря, широты и долготы) [5 ,6]

В работе [7] приводятся соответствующие численные данные (рис. 3):

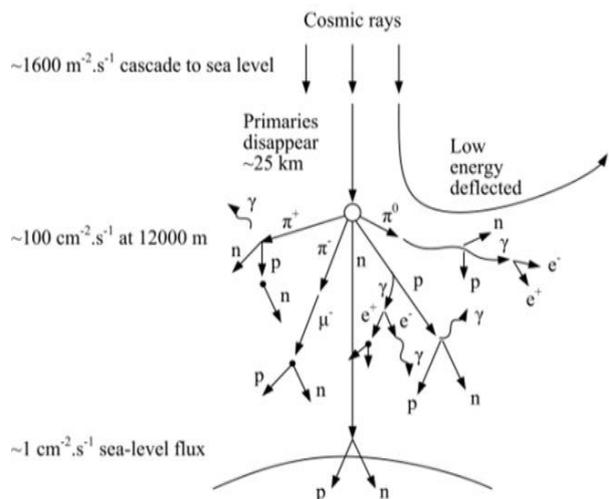


Рис. 3 - Изменение плотности потока атмосферных нейтронов на различных высотах от уровня моря [7]

Проблема устойчивости к космическому излучению актуальна для диодов, тиристоров, GTO, IGCT, IGBT, используемых в наземном промышленном и транспортном электроприводе всех отраслей. Есте-

ственные космические пучки были идентифицированы как причина катастрофических отказов – электрических пробоев (burnouts) силовых полупроводниковых приборов [8], для чего потребовалось проведение испытаний СПП как в зонах с высоким уровнем космического излучения (например, вершина Jungfraujoch в Альпах) [9], так и проведение достаточно сложного комплекса организационно-технических мероприятий, связанных с использованием техники, имитирующей действие космических частиц [10]. Естественная радиационная обстановка в различных регионах мира различна, определяется их географическим положением (широтой и долготой, полушарием), высотой над уровнем моря и активностью Солнца [11], что ставит задачу разработки и применения материалов с высокой радиационной стойкостью в наземных условиях для СПП, эксплуатация которых предполагается в различных регионах мира. Интегрируя в MathCAD уравнение дифференциального потока нейтронов для наземных условий (широта, долгота и высота над уровнем моря), приведенное в [12], получаем численное значение потока, используемое как справочное значение для оценки радиационной обстановки, связанной с атмосферными нейтронами в различных точках мира, $\Phi \approx 6,075 \cdot 10^{-3} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Для высокогорной местности (Боливии, например) вводится множитель, ≈ 9 . Следовательно, при работе электропривода в горах на высоте ≈ 3000 м (для горной местности, до которой осуществляется хозяйственно-производственная деятельность с применением электропривода на силовых полупроводниковых приборах) за расчётное время его эксплуатации (согласно [13], 60000 часов при полной нагрузке) его элементная база подвергнется экспозиционной дозе облучения $\geq 1,18 \cdot 10^7$ нейтронов $\cdot\text{см}^{-2}$, а этот же показатель для ветрогенераторов, работающих на уровне моря, составит при работе в течение 24 часов в течение 20 лет $\geq 3,8 \cdot 10^6$ нейтронов $\cdot\text{см}^{-2}$. Нелинейно возрастающая интенсивность отказов [14], объясняет причину малого использования силовых полупроводниковых приборов в электронных системах, эксплуатируемых в условиях воздействия радиационного фона, пониженных температур, значительных высот. Обеспечение радиационной стойкости СПП – актуальная задача для всех классов высоковольтных приборов, т.к. радиационная стойкость высоковольтных СПП, изготовленных на традиционном кремнии, недостаточна [15,16]. Отказы в основном вызваны нейтронной компонентой космических лучей с энергией свыше 10 МэВ [17], как основного компонента космических лучей. Следовательно, обеспечение радиационной стойкости *гражданского* наземного электропривода является актуальной физико-технологической задачей, требующей использования различных технологий для изготовления приборов, эксплуатируемых в электроприводе, применяемом в различных широтах, а также на уровне моря и в горной местности.

Цель работы

Целью настоящей работы является экспериментальное обоснование возможности применения кремния, легированного изовалентной примесью германия (SiGe) в качестве материала с повышенной радиационной стойкостью для изготовления радиационно стойких СПП.

Изложение основного материала

Для многослойных полупроводниковых приборов необходимо обеспечение стабильного и достаточно высокого времени жизни инжектированных неосновных носителей заряда как до, так и после воздействия облучения [18]. С целью подтверждения эффективности применения Ge как легирующей примеси кремния, используемого при изготовлении приборных структур, исследована возможность замедления радиационной деградации времени жизни неосновных носителей заряда. Выращивание не легированных и легированных германием монокристаллов кремния ориентации $\langle 111 \rangle$ с концентрациями соответственно фосфора, кислорода, углерода: $N_p \approx 1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_o \approx 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_c < 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ производилось по методу Чохральского (CZ-Si) в идентичных условиях из загрузки поликристаллического Si в потоке аргона [19]. Легирование германием осуществлялось до концентрации $N_{Ge} \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [20]. Бездислокационные монокристаллы CZ-Si<P> и CZ-Si<P,Ge> разрезали на пластины и подвергали механической шлифовке и химико-механической полировке. Формирование p^+ - n -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 $^{\circ}\text{C}$ и 1250 $^{\circ}\text{C}$. Глубина залегания p - n -перехода ≈ 5 мкм. Полученные образцы p^+ - n -структур облучали α -частицами с энергией 4 МэВ от радиоизотопного источника интегральным потоком $6,9 \cdot 10^9$ - $2,7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Время жизни неосновных инжектированных носителей заряда τ_p измеряли по переходным характеристикам сформированных тестовых p^+ - n -диодов [21]. В диапазоне доз $\sim 4 \cdot 10^9 \dots 10^{10} \text{ см}^{-2}$ наблюдаются существенно более высокие 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 $\sim 8 \cdot 10^{-8} \text{ с}$.

Моделирование характера изменения τ_p в диапазоне больших доз облучения, достижение которых при натуральных испытаниях технически невозможно или нецелесообразно, производили в среде MathCAD. На рис. 4 представлены экспериментальные и расчётные значения τ_p .

Для описания изменения времени жизни неосновных носителей заряда использованы эмпирические формулы:

$$\tau_{PSi}(t) = A \cdot \left(1 - \frac{\exp(a+b \cdot (t-u))^k}{k}\right) - D,$$

$$\tau_{PSiGe}(t) = \frac{A}{1+10^{a+b \cdot t^{1,125}}} + C,$$

где $A=7 \cdot 10^{-7}$; $C=1 \cdot 10^{-7}$; $D=4,8 \cdot 10^{-7}$; $k=-1,1$;

$a=5 \cdot 10^{-7}$; $b=9 \cdot 10^{-6}$; $u=5 \cdot 10^5$; $t = \frac{\Phi_\alpha}{\varphi}$; Φ_α -

экспозиционная доза облучения α - частицами, $\varphi = 6,4 \cdot 10^6$ частиц/см²·с.

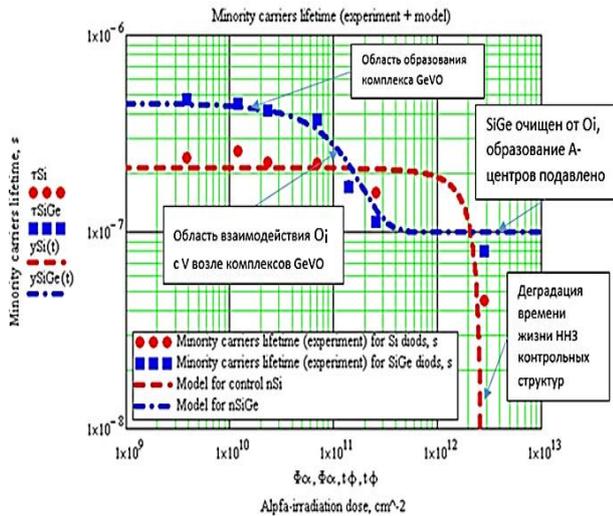


Рис. 4 - Экспериментальные и расчетные значения τ_p в базе p^+ -структур

Время жизни τ_p , а, следовательно, и радиационная стойкость CZ-Si<P,Ge>, нелинейно зависят от дозы облучения. Радиационная стойкость CZ-Si<P,Ge> при больших дозах α -облучения существенно выше, чем у CZ-Si<P>, однако существует критическая доза облучения, $\Phi_\alpha \sim 7 \cdot 10^{10} - 1,1 \cdot 10^{11}$ см⁻², при которой наблюдается резкое снижение радиационной стойкости кремния легированного германием. Стабилизация τ_p при больших дозах облучения свидетельствует о возможности применения монокристаллов CZ-Si<P,Ge> для создания приборов с повышенной радиационной стойкостью. Полученные зависимости качественно могут быть объяснены простой схемой [22]. При облучении Si<P,Ge> образуется устойчивый кластер GeVO, уменьшающий концентрацию вакансий в облучаемом материале и, как следствие, концентрацию радиационных дефектов на начальном этапе облучения. Эффективность процесса формирования стока для вакансий достигается за счёт коррелированного распределения германия и кислорода, приводящего к более полной компенсации внутренних упругих напряжений в кремнии [23]. Сток вакансий, образующих кластер, при $\Phi_\alpha \leq 1 \cdot 10^{11}$ см⁻² уменьшает вероятность образования А- и Е-центров в Si<P,Ge> по сравнению с контрольным Si. После насыщения комплекса Ge-О вакансиями активизируется процесс образования А-центров, достигая максимума при $\Phi_\alpha \approx 1 \cdot 10^{11}$ см⁻². Фактически, увеличение вероятности образования А-центров связано с взаимо-

действием междоузельного кислорода, окружающего атомы Ge, с вводимыми в материал облучением вакансиями. После исчерпания в ходе квазихимической реакции О, вероятность образования комплексов V-О в изовалентно легированном Si существенно ниже, чем в контрольном материале. Это и определяет наблюдаемое замедление деградации τ_p в Si<P,Ge> при больших дозах облучения.

В работе [24] показано, что при облучении нейтронами существует выраженная зависимость коэффициента изменения времени жизни неосновных носителей от коэффициента радиационного изменения удельного сопротивления кремния. Это рассматривается авторами как наличие связи между двумя фундаментальными величинами: временем жизни неосновных носителей заряда τ_{HHZ} и концентрацией основных носителей в Si, или, иными словами, как подтверждение того, что в процессе облучения кремния нейтронами уменьшается концентрация основных носителей заряда, приводя к росту его удельного электрического сопротивления. Следовательно, для объяснения механизма деградации электрофизических свойств кремния при его длительном хранении, наблюдавшегося нами, логично предположение о воздействии на материал атмосферных нейтронов. Эффект более заметно выражен для высокоомного Si, используемого в технологии СПП. Нами были исследованы бездислокационные монокристаллы кремния, выращенных бестигельной зонной плавкой (FZ-Si) диаметром 25-105 мм с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) от 1 до ~1000 Ом·см. В монокристаллах FZ-Si и FZ-Si<P> малых диаметров практически не наблюдались изменения параметров УЭС и τ_{HHZ} в результате длительного хранения.

$$\int_0^{100} x \cdot d\logis(x, 4.86, 0.2501) dx = 4.86$$

$$\int_0^{100} x \cdot f_after_15_years(x) dx = 132.55$$

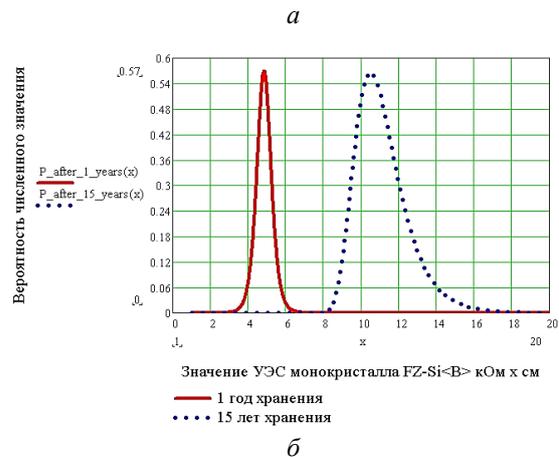


Рис. 5 - Распределение УЭС по поперечному сечению монокристалла FZ-Si после одного года хранения и после 15 лет хранения (а); численные значения средневзвешенного значения УЭС после года и 15 лет хранения (б)

Для FZ-Si диаметром 80-105 мм и УЭС 3-5 кОм·см отмечено увеличение УЭС до величин, приведенных на рис. 5, т.е. \approx в 25 раз. После длительного хранения $\tau_{\text{ннз}}$ снижалось на 10-30 % от типичных значений 500-700 мкс в исходных монокристаллах. После длительного хранения $\tau_{\text{ннз}}$ снижалась на 10...30 % от типичных значений 500...700 мкс в исходных

В монокристаллах FZ-Si<P> диаметром 80 мм с УЭС 2-3 кОм·см после 10-12 лет хранения типичное снижение УЭС составляло $\leq 10\%$, а величины $\tau_{\text{ннз}}$ достигали 500...700 мкс (исходные значения 700...800 мкс). Наибольшая деградация электро-физических параметров наблюдалась для CZ-Si-монокристаллов, подвергнутых нейтронному трансмутационному легированию (НТЛ). Были исследованы монокристаллы кремния Si<P> диаметром 100 мм, с концентрацией фосфора после выращивания на уровне $4,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ($\rho \approx 100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$). Для устранения термодонорного эффекта перед НТЛ монокристаллы отжигали 1 час при 650°C . УЭС термообработанных монокристаллов составляло 35 Ом·см. После облучения реакторными нейтронами монокристаллы отжигали при 850°C в течение 2 часов для стабилизации свойств материала. В результате НТЛ было получено УЭС $\sim 4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и достигнуты весьма низкие объёмная и радиальная неоднородности УЭС - на уровне 2 и 1 % соответственно. После 10 лет хранения наблюдались два основных эффекта, полностью изменившие электрофизические параметры монокристаллов: тип электропроводности изменился с n на p, а УЭС достигло 16 кОм·см. Таким образом, длительная эксплуатация высококачественного монокристаллического Si в СПП даже в электрически неактивном режиме может привести к его заметной деградации после 7-20 лет. С аналогичным фактом сейчас сталкиваются и при эксплуатации кремниевых солнечных элементов и модулей.

Развитие спроса на кремний с высокой эксплуатационной стабильностью определяется, в том числе, массовым внедрением в промышленную эксплуатацию радиационно-технологических установок, что требует снижения стоимости их блоков питания для получения экономически приемлемой цены единицы мощности пучка ускоряемых частиц [25]. Например, для производства полупроводниковых приборов приемлемая цена $\$100...250/\text{Вт}$, а для ускорителей газочисток она должна быть снижена на порядок. Именно этот факт позволяет надеяться на расширение использования SiGe как материала СПП в ускорителях, взамен существенно более дорогих и дефицитных SiC и GaN [26]. Использование SiGe для повышения радиационной стойкости кремния в последнее время рассматривается как один из наиболее современных методов повышения радиационной стойкости полупроводникового материала [27]. Для Si с концентрацией германия $N_{\text{Ge}}=2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ достигнуто существенное повышение радиационной стойкости, оцениваемой по замедлению изменения концентрации основных носителей заряда. Авторами [28] изовалентно

легированный кремний рассматривается как наиболее перспективный материал для изготовления прецизионных детекторов, эксплуатируемых в полях ядерных излучений. Изовалентное легирование (Ge, Pb, Sn) рассматривается как одна из основных возможностей управления радиационным дефектообразованием кремния, используемым для производства приборов с низкой радиационной чувствительностью [29]. Анализ рынков, где предпочтительно применение широкозонных полупроводников, проведенный в [30], показывает, что ярко выраженное теоретическое превосходство GaN над SiGe, эффективно реализуется преимущественно при производстве военной СВЧ радиотехники (рис. 6):

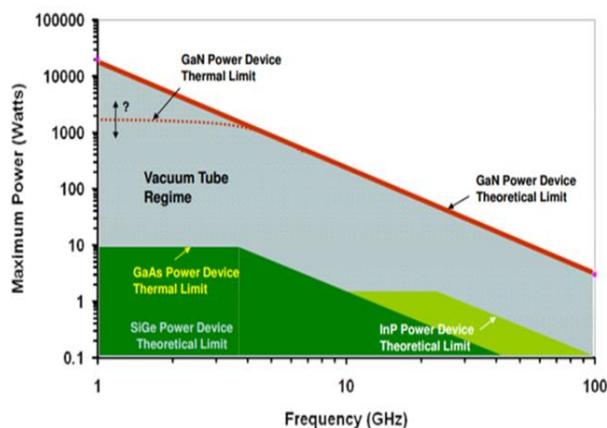


Рис. 6 - Диапазоны работоспособности СПП, изготовленных на различных полупроводниковых материалах [29]

Выводы

Существует проблема непредсказуемых отказов СПП (закорачивание, пробой p-n-переходов) вследствие действия присутствующих в атмосфере высокоэнергетических частиц. Анализ естественной радиационной обстановки в различных регионах мира позволил установить усреднённую величину потока атмосферных нейтронов, $\phi \approx 6,075 \cdot 10^{-3} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, действие которых может привести к повышению вероятности лавинного пробоя СПП, а также к деградации электрофизических параметров монокристаллов при их длительном хранении, деградации характеристик и снижению эффективности работы фотоэлектрических преобразователей. Для преодоления возникающих трудностей целесообразно изготавливать приборы с применением технологий, предусматривающих повышение их радиационной стойкости. Кремний, легированный германием, может в ряде случаев заменить дефицитные и дорогостоящие полупроводниковые материалы - GaAs, GaN, SiC, которые используются для изготовления термически и радиационно стойких полупроводниковых приборов. Установлена возможность замедления радиационной деградации времени жизни неосновных носителей заряда в p^+-n -структурах, подвергнутых облучению α -частицами с энергией 4 МэВ и интегральным потоком

$6,9 \cdot 10^9 - 2,7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, что свидетельствует о возможности применения монокристаллов CZ-Si<P,Ge> для создания приборов с повышенной радиационной стойкостью. Развитие производства материалов с исключительными физико-технологическими свойствами (high-tech materials), в том числе обеспечивающих высокую термическую и радиационную стойкость СПП и электронных устройств, актуально для изменения приоритетов развития экономики страны, и обеспечит повышенный спрос этой продукции на мировых рынках.

Список литературы

1. **Быткин, С.В.** Конкурентная разведка конъюнктурно-технологических перспектив традиционного и high-tech экспорта Украины: монография /С.В. Быткин; Запоріж. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2017. – 276с.
2. **Быткин С.В.** Экспорт полупроводниковых материалов как перспективное направление продаж на мировом рынке /С.В. Быткин, Т.В. Критская //Управленческие технологии в решении современных проблем развития социально-экономических систем. Монография. Под общ. ред. О.В. Мартяковой. Раздел 1.2.7. (стр. 169-176). Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2011. -744 с.
3. **Хавронин С. Б.** Особенности развития наукоёмкого бизнеса в странах Северной Европы /С.Б. Хавронин //Автореф. дисс. к.э.н. по спец. 08.00.14 – мировая экономика. Центр европейских исследований ИМЭМО РАН. М. -2012г. -22 с.
4. **Rahimo M.** Power Semiconductors for Power Electronics Applications ABB Switzerland Ltd. /Munaf Rahimo //Semiconductors. CAS-PSI Special course Power Converters, Baden Switzerland, 8th May 2014, slides 43, 46.
5. **Haungs, A.** Energy spectrum and mass composition of high-energy cosmic rays. //A. Haungs, H. Rebel, M. Roth //Reports on Progress in Physics, 66(7):1145,-2003. <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/66/7/202>
6. **Ziegler, J. F.** Terrestrial cosmic rays /J. F. Ziegler // IBM J. RES. DEVELOP. V. 40 NO. 1 JANUARY -1998, -P. 19-39
7. **Ziegler, J. F.** IBM experiments in soft fails in computer electronics (1978-1994) /J. F. Ziegler, H. W. Curtis, H. P. Muhlfeld, C. J. Montrose et al. //IBM J. RES. DEVELOP. V. 40 NO. 1 JANUARY -1996, P. 3-18
8. **Normand, E.** Los Alamos, NM Neutron-Induced Single Event Burnout in High Voltage Electronics / E. Normand, J. Wert, D. Oberg, P. Majewski, P. Voss, S. Wender. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.boeing.com/assocproducts/radiationlab/publications/Neutron_Induced_Single_Event_Burnout_in_High_Voltage_Electronics.pdf
9. **Findeisen Ch.** Cosmic rays interacting with biased high power semiconductor devices /Ch. Findeisen, E. Herr, Th. Stiasny, H.R. Zeller. //International Foundation HFSJG Activity Report 1999/2000 [Электронныйресурс] /Режим доступа:// http://www.ifjungo.ch/reports/1999_2000/pdf/23.pdf
10. **Patton, M.** Strategies for Radiation Hardness Testing of Power Semiconductor Devices /M. Patton, R. Harris, R. Rohal, T. Blue, A. Kauffman, A. Frasca. //NASA/CR—2005-213807 May 2005 Paper 1021 [Электронныйресурс] Режим доступа:// <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2005/CR-2005-213807.pdf>
11. **Владимиров, В.М.** Планетарное распределение вторичных нейтронов. /В.М. Владимиров, Л.В. Границкий, Н.Н. Гурова, А.В. Салагаева, Р.Г. Хлебопрос. //Сайт «Современные проблемы». [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://modernproblems.org.ru/ecology/14-hlebopros3.html>
12. 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.
13. **Wang, H.** Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics / H. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg et al. //IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics.-2014, - P. 1-18.
14. **Камински Н.** Воздействие космического излучения на интенсивность отказов IGCT. /Н. Камински, А. Чекмарёв, И. Корзина, Т. Стясни // Силовая ка, - 2008. - № 1, [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.power-e.ru/2008_1_30.php
15. **Esquivel A.** How can Motor Drive benefit from Silicon Carbide Products? /AlejandroEsquivel Cree Power – July 2014
16. **Kaminski, N.** Failure Rates of IGCTs Due to Cosmic Rays /N. Kaminski, Th. Stiasny //Application Note 5SYA 2046-01 ABB Switzerland Ltd, Semiconductors. -2005.
17. **Lomonova E.** Cosmic Radiation Kills and may be the primary cause of failures in your high voltage MOSFET based designs /E. Lomonova, J. Schellekens, J. van Duivenbode, AlessioGriffoni, D. Linten //Bodo's Power tems, -December 2011, -. 54-57.
18. **Вологдин Э.Н.** Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборов. /Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. Учебное пособие. М.: Научно-образовательный центр Московского региона в области фундаментальных проблем радиационной физики твердого тела и радиационного материаловедения. МГИЭМ. - 2001. - 70 с.
19. **Критская Т. В.** Современные тенденции получения кремния для устройств электроники. Монография /Т. В. Критская //Запорожье: ЗГИА, -2013. -353 с.
20. **Критская Т.В., Быткин С.В.** Радиационная деградация времени жизни неосновных носителей заряда в кремниевых р+-п-структурах /Т.В.Критская, С.В.Быткин //Металургія. Збірник наукових праць ЗДІА, вип. 1(26). Запоріжжя: ЗДІА. -2012, -С.110-116
21. Исследование процессов восстановления обратного сопротивления диода с р-п-переходом. Учебно-методическое пособие. Составитель **А.П. Лысенко.** //Московский государственный институт электроники и математики (технический университет). М.-2012г. -32 с.
22. **Londos C.A.,** Carbon, oxygen and intrinsic defect interactions in germanium-doped silicon.Semicond. /C.A. Londos, E. N. Sgourou, A. Chroneos, V. V. Emtsev//Sci. Technol. V. 26 (2011) 105024 (7pp) [Электронныйресурс] Режим доступа: Online at stacks.iop.org/SST/26/105024
23. **Кустов В.Е.** Внутренние упругие деформации в кремнии /В.Е. Кустов, Т.В. Критская, Н.А. Трипачко, Л.И. Хируненко, В.И. Шаховцов, В.И. Яшник // Неорганические материалы. - 1991. - т. 27, №6. - С. 1116-1118.
24. **Рахматов А.З.** Анализ переходных процессов в радиационно облучённых кремниевых р+np+ - структурах. /А.З. Рахматов, А.В. Каримов //ФПФИПРSE -2012, vol. 10, No. 4. P.- 392-396
25. **Zimek Z.** New trends in electron accelerators development. PlasTEP seminar: „New trends in application of modern electron beam generation in air pollution” /Z. Zimek // Warsaw.-2014.

26. **Outeiro, MT; Visintini, R; Buja, G.** Considerations in Designing Power Supplies for Particle Accelerators /M.T. Outeiro, R. Visintini, G.Buja //39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (2013) Proceedings Paper. - Pages: 7076-7081 (6).
27. **Барабаш Л.І.** Сучасні методи підвищення радіаційної стійкості напівпровідникових матеріалів /Л.І. Барабаш, І.М. Вишневецький, А.А. Гроза, А.Я. Карпенко, П.Г. Литовченко, М.І. Старчик. //Вопросы атомной науки и техники -2007, № 2. *Серия:* Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (в. 90), -С. 182-189.
28. **Литовченко П.Г.** Вплив домішок на радіаційну стійкість монокристалічного кремнію /П.Г. Литовченко, Л.І. Барабаш, С.В. Бердніченко, Д. Бізелло, В.І. Варніна, А.А. Гроза, О.П. Долголенко, Т.І. Кібкало, В. Ф. Ластовецький, О.П. Литовченко, Л.А. Полівцев, Л.С. Марченко, М.І. Старчик //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. -2009. № 2 (в. 93), -С. 39-42.
29. **Londos C.A.** Impact of isovalent doping on radiation defects in silicon /C.A. Londos, E.N. Sgourou, D. Timerkaeva, A. Chronos, P. Pochet, V.V. Emtsev //Journal of Applied Physics. v.114.-2013. – P. 113504
30. **Higham E.** Future RF Market Opportunities for GaN /E. Higham //Microwave Journal and Strategy Analytics special panel session for IMS, June 20th, Montreal -2012. [Электронный ресурс] Режим доступа http://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi b87OD6brJahUjEXIKHRtoDEIQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.microwavejournal.com%2Fext%2Fresources%2Fpdf-downloads%2FIMS%2FGaN-Panel-session-SA.pdf&usq=AFQjCNEIAUZKHzNN2_3qVgk7tdB8FzcEeA&bvwm=bv.108194040,d.bGg
8. **Normand E.** Los Alamos, NM; Single Neutron-Induced Single Event Burnout Voltage Electronics; E. Normand, J. Wert, D. Oberg, P. Majewski, P. Voss, S. Wender [Elektronnyy resurs] Режим доступа: // http://www.boeing.com/assocproducts/radiationlab/publications/Neutron_Induced_Single_Event_Burnout_in_High_Voltage_Electronics.pdf
9. **Findeisen Ch.** Cosmic rays interacting with biased high power semiconductor devices /Ch. Findeisen, E. Herr, Th. Stiasny, H.R. Zeller. //International Foundation HFSJG Activity Report 1999/2000 [Elektronnyy resurs] /Режим доступа:// http://www.ifjungo.ch/reports/1999_2000/pdf/23.pdf
10. **Patton, M.** Strategies for Radiation Hardness Testing of Power Semiconductor Devices /M. Patton, R. Harris, R. Rohal, T. Blue, A. Kauffman, A. Frasca. //NASA/CR—2005-213807 May 2005 Paper 1021 [Elektronnyy resurs] Режим доступа:// <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2005/CR-2005-213807.pdf>
11. **Vladimirov, V.M.** Planetarnoye raspredeleniye vtorichnykh neytronov. /V.M. Vladimirov, L.V. Granitskiy, N.N. Gurova, A.V. Salagayeva, R.G. Khlebopros. //Sayt «Sovremennyye problemy». [Elektronnyy resurs] Режим доступа: <http://modernproblems.org.ru/ecology/14-hlebopros3.html>
12. 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.
13. **Wang, H.** Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics / H. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg et al. //IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2014, R. 1-18.
14. **Kaminski N.** Vozdeystviye kosmicheskogo izlucheniya na intensivnost' otkazov IGCT. /N. Kaminski, A. Chekmarov, I. Korzina, T. Styasni // Silovaya elektronika, 2008. № 1, [Elektronnyy resurs]. Режим доступа: // http://www.power-e.ru/2008_1_30.php
15. **Esquivel A.** How can Motor Drive benefit from Silicon Carbide Products? /AlejandroEsquivel Cree Power – July 2014
16. **Kaminski, N.** Failure Rates of IGCTs Due to Cosmic Rays /N. Kaminski, Th. Stiasny //Application Note 5SYA 2046-01 ABB Switzerland Ltd, Semiconductors. 2005.
17. **Lomonova E.** Cosmic Radiation Kills and may be the primary cause of failures in your high voltage MOSFET based designs /E. Lomonova, J. Schellekens, J. van Duivenbode, AlessioGriffoni, D. Linten //Bodo's Power Systems, December 2011, . 54-57.
18. **Vologdin E.N.** Radiatsionnyye efekty v nekotorykh klassakh poluprovodnikovyykh priborov. /E.N. Vologdin, A.P. Lysenko. Uchebnoye posobiye. M.: Nauchno-obrazovatel'nyy tsentr Moskovskogo regiona v oblasti fundamental'nykh problem radiatsionnoy fiziki tverdogo tela i radiatsionnogo materialovedeniya. MGIEМ. 2001. 70 s.
19. **Kritskaya T. V.** Sovremennyye tendentsii polucheniya kremniya dlya ustroystv elektroniki. Monografiya /T. V. Kritskaya //Zaporozh'ye: ZGIA, 2013. 353 s.
20. **Kritskaya T.V., Bytkin S.V.** Radiatsionnaya degradatsiya vremeni zhizni neosnovnykh nositeley zaryada v kremniyevykh p+-n-strukturakh /T.V.Kritskaya, S.V.Bytkin //Metalurgiya. Zbirnik naukovikh prats' ZDIA, vip. 1(26). Zaporizhzhya: ZDIA. 2012, S.110-116
21. Issledovaniye protsessov vosstanovleniya obratnogo soprotivleniya dioda s p-n-perekhodom. Uchebno-

References (transliterated)

1. **Bytkin, S.V.** Konkurentnaya razvedka kon"yunkturo-tehnologicheskikh perspektiv traditsionnogo i high-tech eksporta Ukrainy: monografiya /S.V. Bytkin; Zaporiz. derzh. inzh. akad. – Zaporizhzhya: ZDIA, 2017. – 276s.
2. **Bytkin S.V.** Eksport poluprovodnikovyykh materialov kak perspektivnoye napravleniye prodazh na mirovom rynke /S.V Bytkin, T.V. Kritskaya //Upravlencheskiye tekhnologii v reshenii sovremennykh problem razvitiya sotsial'no-ekonomicheskikh sistem. Monografiya. Pod obshch. red. O.V. Martyakovoy. Razdel 1.2.7. (str. 169-176). Donetsk: GVUZ «DonNTU», 2011. -744 s.
3. **Khavronin S. B.** Osobennosti razvitiya naukoymkogo biznesa v stranakh Severnoy Yevropy /S.B. Khavronin //Avtoref. diss. k.e.n. po spets. 08.00.14 – mirovaya ekonomika. Tsentr yevropeyskikh issledovaniy IMEMO RAN. M. 2012g. 22 s.
4. **Rahimo M.** Power Semiconductors for Power Electronics Applications ABB Switzerland Ltd. / Munaf Rahimo // Semiconductors. CAS-PSI Special course Power Converters, Baden Switzerland, 8th May 2014, slides 43, 46.
5. **Haungs A.** Energy of high-energy cosmic rays. // A. Haungs, H. Rebel, M. Roth // Reports on Progress in Physics. 66 (7): 1145, 2003. <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/66/7/202>
6. **Ziegler, J. F.** Terrestrial cosmic rays / J. F Ziegler // IBM J. RES. DEVELOP. V. 40 NO. 1 JANUARY 1998, R. 19-39
7. **Ziegler, J.F.** computer electronics (1978-1994) / J. F. Ziegler, H. W. Curtis, H. P. Muhlfeld, C. J. Montrose et al. // IBM J. RES. DEVELOP. V. 40 NO. 1 JANUARY 1996, R. 3-18

- metodicheskoye posobiye. Sostavitel' **A.P. Lysenko**. //Moskovskiy gosudarstvennyy institut elektroniki i matematiki (tekhnicheskiy universitet). M. 2012g. 32 s.
22. **Londos C.A.**, Carbon, oxygen and intrinsic defect interactions in germanium-doped silicon. *Semicond. /C.A. Londos, E. N. Sgourou, A. Chroneos, V. V. Emtsev//Sci. Technol. V. 26 (2011) 105024 (7pp) [Elektronnyyresurs] Rezhim dostupa: Online at stacks.iop.org/SST/26/105024*
 23. **Kustov V.Ye.** Vnutrenniye uprugiyе deformatsii v kremnii /V.Ye. Kustov, T.V. Kritskaya, N.A. Tripachko, L.I. Khirunenko, V.I. Shakhovtsov, V.I. Yashnik // *Neorganicheskiye materialy. 1991. - t. 27, №6. S. 1116-1118.*
 24. **Rakhmatov A.Z.** Analiz perekhodnykh protsessov v radiatsionno obluchonnykh kremniyevykh p+nn+ - strukturakh. /A.Z. Rakhmatov, A.V. Karimov // *FÍPFIPSE 2012, vol. 10, No. 4. R. 392-396*
 25. **Zimek Z.** New trends in electron accelerators development. PlasTEP seminar: "New trends in air pollution" / Z. Zimek //Warsaw. -2014
 26. **Outeiro, MT; Visintini, R; Buja, G.** Considerations in Designing Power Supplies for Particle Accelerators /M.T. Outeiro, R. Visintini, G.Buja // 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (2013) Proceedings Paper. Pages: 7076-7081 (6).
 27. **Barabash L.I.** Such methods of podvyschennya rad_atsiyno i stikkost_ napivvrovnikny mater_al_v / L.I. Barabash, I.M. Vishnevsky, A.A. Thunderstorm, A.YA. Karpenko, P.G. Litovchenko, M.I. Starchik // *Problems of Atomic Science and Technology 2007, No. 2. Series: Physics of radiation damage and radiation materials science (V. 90), P. 182-189.*
 28. **Litovchenko P.G.** Vpl dom_shok on radiatsiyu sty_ykist monocrystal silicon / P.G. Litovchenko, L.I. Barabash, S.V. Berdnichenko, D. Bizello, V.I. Varnina, A.A. Thunderstorm, O.P. Dolgolenko, T.I. Kibkalo, V.F. Lastovetsky, OP Litovchenko, L.A. Polivtsev, L.S. Marchenko, M.I. Starchik // *Questions of atomic science and technology. Series: Physics of Radiation Damage and Radiation Materials. 2009. № 2 (v. 93), p. 39-42.*
 29. **Londos C.A.** Impact of isovalent doping on radiation defects in silicon /C.A. Londos, E.N. Sgourou, D. Timerkaeva, A. Chroneos, P. Pochet, V.V. Emtsev // *Journal of Applied Physics. v.114. 2013. - R. 113504 30.*
 30. **Higham E.** Future RF Market Opportunities for GaN / E. Higham // *Microwave Journal and IMS, June 20th, Montreal 2012. [Elektronnyyresurs] Rezhim dostupa: http://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1 & source = web & cd = 1 & cad = rja & uact = 8 & ved = 0ahUKEwib87OD6brJAhUjEXIKHRtoDEIQFggaMAA & url = http% 3A% 2F% 2Fwww.microwavejournal.com% 2Fext% 2Fresources% 2Fpdf-downloads% 2FIMS% 2FGaN-Panel-session-SA.pdf & usg = AFQjCNEiAUZKHzNN2_3qVgk7tdB8FzcEeA & bvm = bv.108194040, d.bGg*

Сведения об авторах (About authors)

Быткин Сергей Витальевич, кандидат технических наук, доцент, начальник отдела конъюнктурно - технологического системного анализа ПАО «Запорожсталь», г.Запорожье, Украина; e-mail: bytkin@bigmir.net

Sergey Vital'evich Bytkin, Cand.Tech.Sci., Associate Prof., Head of the Department of Conjunction and Technology System Analysis of PJSC "Zaporizhstal", Zaporozhye, Ukraine; e-mail: bytkin@bigmir.net

Крытская Татьяна Владимировна, доктор технических наук, профессор, Запорожская государственная инженерная академия, заведующая кафедрой электронных систем, +38-061-2120738; e-mail: krytskaja2017@gmail.com

Krytskaya Tatyana Vladimirovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Zaporizhzhya State Engineering Academy, Head of the Department of Electronic Systems, + 38-061-2120738; e-mail: krytskaja2017@gmail.com

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

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. Крытская** // *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.

Please cite this article as:

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.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Биткін, С. В. Кремній легований германієм (sige), як матеріал для виготовлення силових напівпровідникових приладів, стійких до дії вторинного космічного випромінювання / **С. В. Биткін, Т. В. Крицька** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: *Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 102-109. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.14.

АНОТАЦІЯ. Проблема непередбачуваного виходу з ладу силових напівпровідникових приладів може бути вирішена при використанні технологій, що забезпечують підвищення їх радіаційної стійкості. Використання монокристалів кремнію, легованих германієм, уповільнює деградацію характеристик приладів при впливі іонізуючих випромінень, що є альтернативою дефіцитним і дорогим GaAs, GaN, SiC, застосовуваним для цих цілей. Вплив вторинного космічного випромінювання може бути відповідальним за деградацію електрофізичних параметрів монокристалів кремнію при їх тривалому зберіганні, а також за зниження ефективності роботи полупровідникових перетворювачів сонячної енергії.

Ключові слова: кремній, легований германієм; силовий напівпровідниковий прилад; пробою р-п-переходу; вторинне космічне випромінювання.

Надійшла (received) 21.07.2019