

С.В. Быткин ⁽¹⁾, зам. директора, к.т.н.Т.В. Критская ⁽²⁾, профессор, д.т.н.

КРЕМНИЙ, ЛЕГИРОВАННЫЙ ГЕРМАНИЕМ, КАК АЛЬТЕРНАТИВА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

⁽¹⁾ ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь»,⁽²⁾ Запорожская государственная инженерная академия

Подано огляд розвитку силового напівпровідникового приладобудування. Встановлено вплив космічних випромінювань на відмови та вихід з ладу могутніх пе-ретворювачів, що знаходяться більше 50 % часу перемикання під дією високої напруги. Показано, що у міру ускладнення конструкції виробів електронної техніки, вони повинні виготовлятися за радіаційно стійкою технологією. Вирішити проблему стійкої роботи силових напівпровідникових приладів під дією космічних частинок представляється можливим за рахунок використання радіаційно стійкого напівпровідникового матеріалу – монокристалів CZ-Si, легованих германієм.

Дан обзор развития силового полупроводникового приборостроения. Установлено влияние космических излучений на отказы и выход из строя мощных преобразователей, находящихся более 50 % времени переключения под действием высокого напряжения. Показано, что по мере усложнения конструкции изделий электронной техники они должны изготавливаться по радиационно-стойкой технологии. Решить проблему устойчивой работы силовых полупроводниковых приборов под действием космических частиц представляется возможным за счет использования радиационно-стойкого полупроводникового материала – монокристаллов CZ-Si, легированных германием.

Около половины электроэнергии, вырабатываемой на тепловых, гидро- и атомных электростанциях, подвергается преобразованию для нужд потребителей с помощью средств силовой полупроводниковой электроники. Основным материалом для силовых полупроводниковых приборов (СПП) в течение последних десятилетий является кремний. Альтернативой ему может служить карбид кремния благодаря высоким теплопроводности, порогу лавинного разрушения, насыщенной скорости электронного дрейфа (табл. 1). Однако технология высокочистого карбида кремния сопряжена с большими трудностями в связи с высокой температурой получения кристаллов (1600...2500 °C), их дефектностью, высокой твердостью, сложностью получения однофазного материала (вследствие политипизма SiC) и др.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика свойств кремния и карбида кремния [1]

Свойство	Si	3C SiC	6H SiC	4H SiC
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,1	2,2	3,0	3,3
Насыщенная скорость дрейфа электронов, см/с	10 ⁷	2,5·10 ⁷	2·10 ⁷	2·10 ⁷
Подвижность электронов, см ² /В·с	1350	1000	380	947
Напряженность электрического поля пробоя, В/м	2·10 ⁵	3·10 ⁶	4·10 ⁶	3·10 ⁶
Теплопроводность, Вт/(см·К)	1,5	4,9	5,0	5,0

Количество типонаименований выпускаемых видов СПП в мире насчитывает десятки тысяч наименований. Однако номенклатура приборов и сферы их применения постоянно расширяются, что обуславливает и рост производства монокристаллического кремния для нужд силового приборостроения в среднем на 10...15 % в год.

По различным оценкам [2-5], для нужд силового приборостроения используется 10...16 % объема производимого кремния, что соответствует ~ 1,5 тыс. т в год. Мировой рынок СПП в 2010 г. составил ~ 27 млрд. долл. США [5].

Оптимальное насыщение энергетики средствами силовой электроники позволило бы сэкономить не менее 10...15 % производимой энергии, что примерно равно вкладу всей атомной энергетики [4,6,7].

Многие мировые электронные фирмы в последнее время направляют свои усилия на развитие именно силовой электроники, поскольку это менее затратная отрасль, чем кремниевая микроэлектроника. В конце 90-х годов общий объем продаж приборов силовой электроники в европейских странах (без России, Украины, Эстонии) составил ~ 650...800 млн. долл. США. В это же время более двухсот ведущих электронных фирм США продали полупроводниковых приборов и мощных интегральных систем на сумму ~11 млрд. долл. [8].

Экономический кризис 90-х годов и неконтролируемый импорт изделий силовой электроники из-за рубежа привел к существенному сокращению выпуска аналогичной продукции в Украине и России. В настоящее время объем продаж в России находится на уровне ~ 35...50 млн. долл., в Украине ~ 1 млн., долл. США [3,8].

Приборы силовой электроники широко используются практически во всех отраслях промышленности: для передачи электроэнергии на большие расстояния, в энергоемких химических и металлургических производствах, на транспорте, в системах электропривода, в военной, аэрокосмической технике, в современных автомобилях и бытовой технике. 90-е годы ознаменованы проникновением микроэлектроники в силовое приборостроение. Так, классический биполярный транзистор практически вытеснен биполярным транзистором с изолированным затвором (IGBT), весьма перспективно использование разработанных и совершенствуемых конструкций мощных полевых транзисторов (MOSFET, FET, SIT, HEXFET) и «интеллектуальных» силовых интегральных схем (SMART POWER IC). Эти приборы, по сути, являются типичными, достаточно сложными интегральными микросхемами с малой энергоемкостью и высоким быстродействием. Силовые интегральные монолитные и гибридные схемы используются в современных преобразователях малой и средней мощности (1...30 кВт) в одном кристалле, либо в одном корпусе с силовым прибором в схемах управления, защиты и диагностики, что позволяет резко уменьшить габариты и стоимость, а также увеличить надежность преобразователей [2]. Принципиальное значение имеет применение силовых приборов с полевым управлением, поскольку они значительно проще сопрягаются с цифровыми системами управления и имеют малые коммутационные потери.

Доминирующими приборами для диапазонов больших мощностей и низких частот являются IGCT. Материалом для их изготовления служат однородные монокристаллы высокочистого кремния диаметром 76...150 мм, получаемые методом бестигельной зонной плавки (FZ), а также монокристаллы, подвергнутые нейтронному трансмутационному легированию. Для создания биполярных и

полевых транзисторов используются эпитаксиальные структуры, где подложкой является низкоомный кремний диаметром 76...150 мм, получаемый методом Чохральского (CZ). Основные требования к материалу подложки – низкое содержание остаточных и фоновых примесей, а также ростовых дефектов структуры [9,10]. Их наличие приводит к образованию дефектов в эпитаксиальном слое и может явиться причиной возникновения p - n -переходов на границе «подложка-эпислой». Для дискретных приборов средних классов (токи до 80 А, обратные пробивные напряжения – менее 2 кВ) используются монокристаллы, полученные как методом бестигельной зонной плавки (FZ), так и методом Чохральского (CZ), диаметром 76...150 мм (в странах СНГ 40...100 мм) и величиной удельного электрического сопротивления (УЭС) 40...90 Ом.см. При использовании монокристаллов CZ-Si важно не допустить образования крупных преципитатов кислорода и окислительных дефектов упаковки на стадиях изготовления прибора, так как это приводит к увеличению токов утечки и повышает вероятность пробоя структуры.

Кризисные процессы в экономике СНГ, приведшие к упадку микроэлектроники, в меньшей степени коснулись силовой электроники. Сохранить свой потенциал ей удалось благодаря наличию складских и резервных запасов кремния, меньшим темпам конверсии, заделам научно-исследовательских работ. Для выпуска конкурентоспособных приборов силовой электроники не так критичен диаметр используемого монокристалла и не требуются субмикронные топологические размеры элементов (достаточно 0,25...0,5 мкм). Обеспечить бесперебойную работу отрасли могут предприятия, оснащенные оборудованием для выращивания и технологической обработки монокристаллов диаметром 40...150 мм, комплекс которого в настоящее время имеется в странах СНГ.

На предприятиях силовой электроники в СССР 60...80 % потребляемого кремния были монокристаллы, выращенные по методу Чохральского и 20...35 % - по методу бестигельной зонной плавки (в том числе и нейтронно-легированный кремний). В связи с кризисным состоянием экономики после распада СССР силовая электроника переориентировалась на импортируемый монокристаллический кремний, в основном, производимый в Германии. Предприятия-производители приборов силовой электроники: ЗАО «ВЗП-Микрон» (г. Воронеж), АО БЗПП (г. Брянск), завод «Электровыпрямитель» (г.Саранск), ЗАО «Протон-Электротекс» (г. Орел), ОАО «Электромодуль» (г. Чебоксары) в России, ПО «Преобразователь» (г. Запорожье. Украина), завод «Транзистор» (г.Минск, Беларусь) – смогли сохранить и расширить свою технологическую базу, закупить лицензии у передовых фирм, а также провести аттестацию своей продукции в соответствии с мировыми стандартами. Перечисленные предприятия освоили производство почти всей номенклатуры современных приборов силовой электроники. Параметры СПП, выпускаемых отечественными производителями, близки к зарубежным аналогам, однако стоимость их существенно ниже [8].

В частности, стоимость силовых тиристорov, закупаемых в настоящее время Украиной, составляет ~ 1000 долл. США за один кА, стоимость импортируемых монокристаллов FZ-Si для производства собственных приборов ~ 400...450, а нейтронно-легированных FZ-Si – 1000...1100 долл. США за один кг.

IGBT в настоящее время являются основными приборами силовой электроники в области преобразуемых мощностей от долей киловатта до десятков мегаватт, где потребляется основное количество электроэнергии. Конструкция и

технология изготовления IGBT-чипов непрерывно усложняются. Промышленный выпуск таких чипов возможен только на базе микроэлектронных технологий высокого уровня. Ориентировочная стоимость такого производства превышает 2 млрд. долл. США, а рентабельным оно становится при годовом выпуске в несколько млн. чипов.

Российская Федерация из-за кризисных явлений осталась без собственной элементной базы в самых массовых и важных областях преобразовательной техники, которая сейчас в России развивается гораздо быстрее, чем промышленность в целом. Рынок СПП в странах СНГ очень велик и может составить, по некоторым оценкам, 170...190 млн. долл. США в год. Однако этот рост идет, в основном, за счет импорта как преобразовательного оборудования, базирующегося на IGBT, так и самих IGBT. Годовой объем импорта в разы превышает собственное производство преобразователей. Такая зависимость от импорта в стратегически важных отраслях очень опасна, а организовать производство IGBT путем закупки и освоения технологий в настоящее время вряд ли возможно вследствие серьезной конкуренции на рынке [11].

Основной тенденцией рынка СПП является создание мощного высоконадежного электропривода, включающего высоковольтные СПП. Например, для цехов горячей прокатки тонкого листа требуются электроприводы мощностью не менее 7 МВт.

Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе РАН совместно с «ВЗПП-Микрон» создан и запатентован интегральный тиристор с внешним полевым управлением – новый прибор силовой микроэлектроники, параметры которого в области больших рабочих напряжений аналогичны либо превышают параметры современных IGBT ведущих зарубежных фирм. Конструкция ячейки микротиристорного чипа существенно проще, чем конструкция ячейки IGBT, благодаря чему интегральный тиристор может, после некоторой доработки, выпускаться в промышленных масштабах на имеющихся в «ВЗПП-Микрон» технологических линиях с топологическим разрешением 1,5...2,0 мкм. Для внешнего управления чипом разработан мощный низковольтный полевой транзистор с малым сопротивлением, а также высоковольтный ультрабыстрый диод (УБД) с «мягким» восстановлением, предназначенный для работы в качестве встречно-параллельного диода с интегральным тиристором. На основе этой элементной базы создан первый полностью российский силовой модуль для энергоэффективных преобразователей электроэнергии.

Специалисты ФТИ участвуют в разработке модулей с блокируемым напряжением в 6,5 кВ, а также специальной серии интегральных тириستоров для импульсной техники. Предварительные исследования показали возможность создания супербыстродействующих приборов с очень большой скоростью нарастания и спада тока.

В то же время высоковольтные СПП гибридной конструкции оказались более чувствительными к радиации, в том числе к космическим излучениям, приводящим к уменьшению надежности работы прибора при облучении практически на порядок [12].

Космическая частица высокой энергии (например, протон), попадая в кремниевый кристалл, порождает очень большое количество электронов и дырок. Если полупроводниковый прибор находится в закрытом состоянии под высоким напряжением, то из-за большой напряженности поля в приборе количество возникающих носителей заряда возрастает лавинообразно, что приводит к пробое, сосредоточенному в очень малой области, и может вызвать разрушение прибора [13].

Для уменьшения накопления заряда в кристалле и снижения вероятности лавинного пробоя необходимо уменьшение длины трека частицы, то есть уменьшение толщины полупроводникового компонента. Толщина компонентов прибора и распределение электрического поля в них должны быть выбраны таким образом, чтобы происходило не более 1...3 пробоев на 1 см² поверхности прибора за один миллиард часов его работы. Высоковольтные полупроводниковые компоненты по толщине уже приблизились к критическому пределу и дальнейшее уменьшение толщины кристалла вызовет рост потерь запираания.

Второй проблемой является необходимость использования высокоомного кремния. В работе [14] приведена расчетная зависимость количества отказов от удельного сопротивления материала n базы СПП. Если уровень концентрации примесей в полупроводнике находится на очень низком уровне, то электрическое поле распространяется по всей толщине структуры даже при низком напряжении. Показано, что повышение приложенного к структуре площадью 60 см² напряжения с 2,2 до 2,8 кВ существенно ухудшает надёжность изделия и отрицательно влияет на переходные процессы электрической цепи.

Моделирование процесса отказа различных СПП (включая GTO, IGBT) проведено в работе [15]. Показано, что вероятность отказа (пробоя) СПП нелинейно зависит от приложенного к прибору напряжения (U), удельного сопротивления базы изделия (ρ), площади кристалла прибора (S), их соотношения между собой. Нормированная по удельному сопротивлению зависимость расчетного количества отказов СПП от приложенного напряжения оценивается фактором поля $S \equiv (U/\rho)^{0,5}$.

Проблема предотвращения отказов и обеспечения возможности работы наземных СПП при высоких постоянных напряжениях в условиях действия космических частиц все еще не решена. Особенно актуально обеспечение радиационной стойкости многослойных структур для специальной (военной и аэрокосмической) техники. По мнению авторов [16,17], использование тиристорov в бортовых системах энергоснабжения оборудования невозможно по причине низких экономичности и радиационной стойкости многослойных биполярных приборов, вызванных падением напряжения на p - n переходах.

С аналогичными проблемами сталкиваются разработчики наземных систем питания, работающих при действии гамма-излучения, в частности, систем энергоснабжения ускорителей [18].

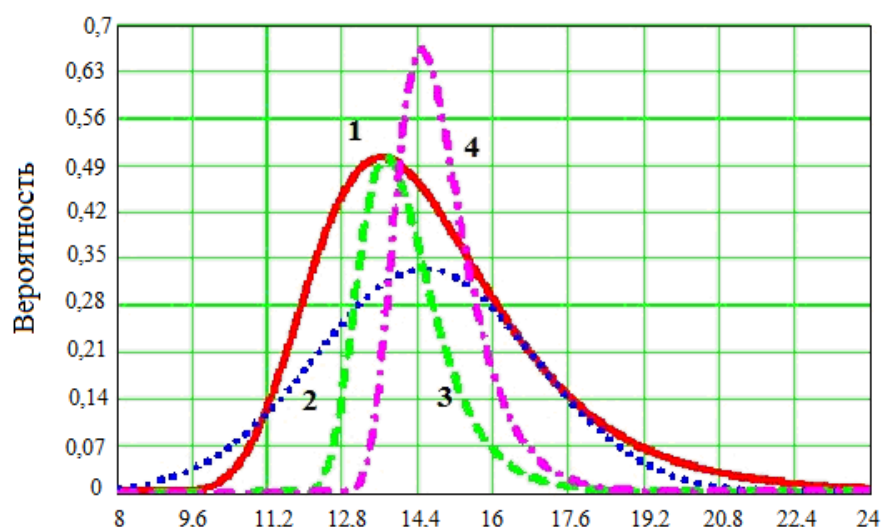
Таким образом, микроэлектронные и силовые полупроводниковые приборы, по мере усложнения конструкции (снижения топологических размеров), как гражданского, так и военного назначения должны изготавливаться по радиационно-стойкой технологии. Решить проблему устойчивой работы СПП под действием космических частиц представляется возможным за счет использования радиационно-стойкого полупроводникового материала – монокристаллов CZ-Si, легированных германием, поскольку технологии производства и использования в приборах широкозонных полупроводниковых материалов, например SiC, уступают «кремниевым технологиям», в том числе и по экономическим причинам.

Нами были проведены исследования по использованию монокристаллов CZ-Si<P,Ge> при изготовлении маломощных тиристорov (обратное приложенное напряжение до 100 В). Использовали монокристаллы с концентрацией фосфора $3 \cdot 10^{14}$ см⁻³, концентрацией германия $\sim 5 \cdot 10^{19}$ см⁻³ (CZ-Si<P,Ge>) и контрольные монокристаллы, не содержащие германий, с такой же концентрацией фосфора (CZ-Si<P>). Тиристоры изготавливали по диффузионной планарной технологии. Облучение гамма-квантами производили в диапазоне доз от 0 до $2,94 \cdot 10^6$ мЗв. Для

обработки полученных результатов использованы возможности среды «Statistica6.0» и «MathCAD11» [11,12]. Плотность вероятности распределения токов удержания и токов утечки получена математической обработкой соответствующих гистограмм

Тиристорная n - p - n - p -структура является удобной физической моделью для проведения исследований, так как большинство характеристик тиристора определяется качеством его широкой базовой области (150 мкм при толщине пластины ~ 200 мкм).

Распределение наиболее вероятных величин тока удержания маломощных тиристоров на кремнии и $Si<Ge>$ приведено на рис 1.



Ток удержания тиристора, мА

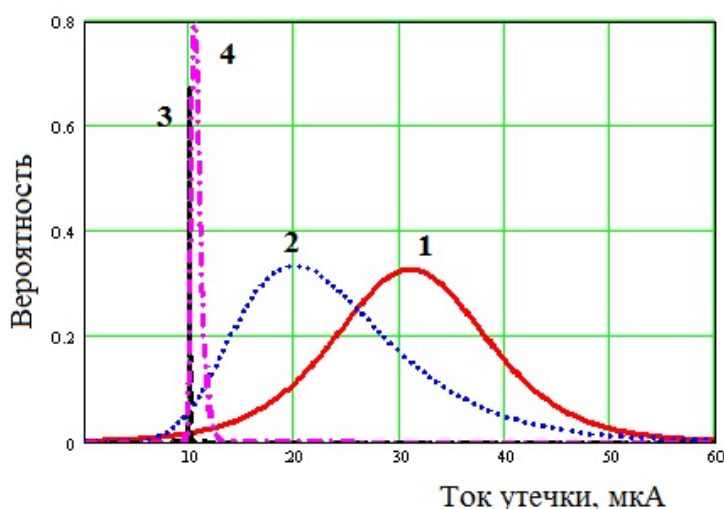
1 - CZ-Si<P>до облучения, 2 - CZ-Si<P>после облучения,
3 - CZ-Si<P,Ge> до облучения, 4 - CZ-Si<P,Ge> после облучения

Рисунок 1 – Распределение тока удержания маломощных тиристоров на CZ-Si<P> и CZ-Si<P,Ge>

Величины токов удержания тиристоров на Si и $Si<Ge>$ до и после облучения практически одинаковы, однако ширина пика на распределении для тиристоров на $Si<Ge>$ намного меньше. Помимо этого наличие «хвостов» в правой части кривой распределения для тиристоров на кремнии свидетельствует о том, что имеется достаточно высокая вероятность их отказов как до, так и после облучения. Малая ширина пика в распределении тока удержания тиристоров на основе $Si<Ge>$ до облучения и после облучения может свидетельствовать о повышенной (в 2...3 раза) воспроизводимости характеристик исследуемых структур, по сравнению с тиристорами на основе кремния. Следовательно, можно говорить и о технологичности кремния, легированного германием. При его использовании нет необходимости корректировать серийный технологический маршрут изготовления тиристоров, имеющийся для нелегированного германием кремния. Сохранение формы кривой распределения может свидетельствовать, в том числе, и о хорошей термической стабильности кремния, легированного германием, при технологических термообработках процессов диффузии бора, фосфора (температура ~ 1000 °C), окисления (~ 1250 °C) и др. в отличие от нелегированного германием кремния.

Распределение токов утечки маломощных тиристоров на кремнии и $Si<Ge>$ приведено на рис. 2.

Следует отметить существенное влияние γ -облучения на изменение формы кривой распределения токов утечки, как для контрольных, так и для исследуемых тиристоров. Наиболее вероятное значение тока утечки для контрольных образцов уменьшается примерно на 30 % после воздействия облучения, однако его численное значение практически в два раза выше, чем для исследуемых тиристоров. Полученные результаты указывают на принципиальную возможность применения $Si<Ge>$ с концентрацией германия $\sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для изготовления маломощных тиристоров с низкими токами утечки как до, так и после облучения.



1 - тиристор на основе CZ-Si<P> до облучения; 2 - тиристор на основе CZ-Si<P> после облучения; 3 - тиристор на основе CZ-Si<P,Ge> до облучения; 4 - тиристор на основе CZ-Si<P,Ge> после облучения;

Рисунок 2 – Распределение токов утечки маломощных тиристоров на CZ-Si<P> и CZ-Si<P,Ge>

Выводы

1. Требование радиационной стойкости современных микроэлектронных и силовых полупроводниковых приборов является одной из основных тенденций электронной техники. Для структур с малыми (нано) размерами элементов космические частицы на поверхности Земли приводят к эффекту «закорачивания» и пробоем p - n -переходов.

2. Развитие СПП возможно за счет использования радиационно-стойкого материала, в том числе кремния, легированного германием.

3. Подтверждена целесообразность использования монокристаллов CZ- $Si<Ge>$ с $N_{Ge} \sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при изготовлении маломощных планарных тиристоров (прямой ток 20...50 мА), что позволяет улучшить рабочие характеристики, а также уменьшить их деградацию при действии γ -облучения в диапазоне доз до $2,94 \cdot 10^6 \text{ мЗв}$. Сохранение низких токов утечки маломощных тиристорных структур после облучения позволяет предположить повышенную радиационную стойкость силовых приборов, изготовленных на кремнии, легированном германием.

4. Развитие силовой электроники обеспечит подъем всей отечественной электронной промышленности в Украине и странах СНГ, потребует расширения выпуска монокристаллов кремния, явится стимулом для роста производств трихлорсилана, моносилана и высококачественного поликристаллического

кремния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Таиров, Ю. М.* Рост кристаллов и политипизм карбида кремния [Текст] / Ю. М. Таиров, В. Ф. Цветков // Рост кристаллов. – М. : Наука, 1980. – Т. 13. – С. 104-111.
2. *Грехов, И. В.* Кремниевая силовая электроника: состояние и перспективы развития [Текст] / И. В. Грехов // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2000. – № 3. – С. 9-15.
3. Анализ производства и потребления монокристаллов кремния в России для нужд силового приборостроения [Текст] / А. А. Кравцов, В. В. Чибиркин, П. М. Гринштейн, Ю. И. Си-доров // Известия вузов. Цветная металлургия. – 1997. – № 5. – С. 18-20.
4. Бюллетень иностранной коммерческой информации (БИКИ) [Текст] : М. : Изд-во Всероссийского научно-исследовательского конъюнктурного ин-та (ВНИКИ). – БИКИ № 19 (8515). – 18.02.2003. – С. 15-16.
5. *Sheppard, G.* Cost Reduction Opportunities for Inverters [Электронный ресурс] / Photon Inverter Conference March 26 – 2012. – Режим доступа : \www/ greg.sheppard@ihs.com – Загл. с экрана.
6. *Мильвидский, М. Г.* Полупроводниковый кремний на пороге XXI века [Текст] / М. Г. Мильвидский // Известия Вузов. Материалы электронной техники. – 2000. – № 1. – С. 4-14.
7. *Ушаков, А. Б.* Проблемы развития российской электроники [Текст] / А. Б. Ушаков // Цветная металлургия. – 1997. – № 5. – С. 13-17.
8. *Енишерлова, К. Л.* Проблемы кремния в силовой электронике: монокристаллы, пластины, структуры [Текст] / К. Л. Енишерлова, Ю. А. Концевой // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2000. – № 4. – С. 4-9.
9. Нейтронно-легированный БЗП кремний и высоковольтные приборы на его основе [Текст] / Л. Н. Сафонов, Е. В. Чернявский, В. П. Попов и др. // «Кремний-2004» : тез. докл. совещания, 5-9 июля 2004 г., Иркутск : Изд-во Института географии СО РАН, 2004. – С. 152.
10. Многослойные структуры на кремнии для элементной базы интеллектуальной силовой микроэлектроники [Текст] / Г. Н. Камаев, А. Т. Дрофа, В. В. Болотов и др. // «Кремний-2002» : тез. докл. совещания, 9-12 июля 2002 г., Новосибирск : Изд-во ИФП СО РАН, 2002. – С. 173.
11. *Грехов, И. В.* О возможности создания собственной силовой микроэлектроники в России [Текст] / И. В. Грехов // «Кремний-2011» : тез. докл. VIII межд. конф., 5-8 июля 2011 г., М. : МИСиС, 2011. – С. 241.
12. *Камински, Н.* Воздействие космического излучения на интенсивность отказов IGBT [Текст] / Н. Камински, Т. Стяни // Силовая электроника. – 2008. – № 1. – С. 30-32.
13. *Busatto, G.* Cosmic Rays induced Single Event Effects in Power Semiconductor Devices [Электронный ресурс] / G. Busatto // Naples, June, 4th 2006. – Режим доступа : // \www/ http:// g.eng.cam.ac.uk/robuspic/pub_present/ISPSD06/02_Busatto.pdf – Загл. с экрана.
14. *Weber, A.* New Generation of Asymmetric and Reverse Conducting GTOs and their Snubber Diodes [Электронный ресурс] / A. Weber, N. Galster, E. Tsyplakov // Power Conversion June 1997 Proceedings, PCIM97, Nürnberg – Режим доступа : \www/ /http : // 05.abb.com /global/ scot/scot256.nsf/veritydisplay/e6ecac2bc4ef17a8c1256b9c003f8f85/\$file/nu97aw.pdf – Загл. с экрана.
15. *Zeller, H. R.* Cosmic Ray Induced Failures in High Power Semiconductor Devices. ABB Semiconductors AG. [Электронный ресурс] / H. R. Zeller. – Режим доступа : \www/ / http : // 5scomponents.com/pdf/gto_and_thyristor_cosmic_ray_paper.pdf – Загл. с экрана.
16. *Bruemmer, J. E.* Schmitz Efficient Design in a DC to DC Converter Unit. NASA Technical Memorandum [Электронный ресурс] / J. E. Bruemmer, F. R. Williams G. V. E-13499 prepared for the 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washington,

- DC, July 28–August 2, 2002. [Электронный ресурс] – Режим доступа : \www/ // http : // gltrs.grc.nasa.gov/reports/2002/TM-2002-211804.pdf – Загл. с экрана.
17. *Keller, J.* Power electronics designers look to the future. *Military & Aerospace Electronics* November, 2002. [Электронный ресурс] / Режим доступа: \www/ // http : // mae.pennnet.com/articles/article_display.cfm?Section=ARCHI&C=Feat&ARTICLE_ID=161973&KEYWORDS=Schottky%20QPL&p=32 – Загл. с экрана.
18. *Rausch, R.* Electronic Components & Systems and their Radiation Qualification for Use in the LHC Machine [Электронный ресурс] European laboratory for particle physics, cern-SL division cern SL 99-004 (CO). Invited Paper presented at LHC Electronic Board Workshop Snowmass, Colorado, USA, 20-25 September 1999 / Режим доступа : \www/ // http://project.slac.stanford.edu/lc/local/Radphysics/European_Lab.pdf – Загл. с экрана.

Стаття надійшла до редакції 10.04.2012

р.

Рецензент, проф. Ю.В. Трубіцин