УДК 621.382.019.3

ОБЛАСТЬ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ 4H-SiC ДИОДОВ ШОТТКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЁЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

П.С. Громова¹, А.С. Тарараксин², А.С. Колосова^{1,2}, Д.В. Бойченко²,
В.Н. Выюгинов³, В.В. Лучинин⁴

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва;

² АО «ЭНПО Специализированные электронные системы», г. Москва;

³ АО «Светлана-Электронприбор»; ⁴ СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Экспериментально исследованы одиночные радиационные эффекты отказов в диодах Шоттки на 4H-SiC иностранного производства с рабочим напряжением от 600 В до 1700 В. Определены области безопасной работы по эффекту одиночного пробоя от тяжёлых заряженных частиц космического пространства, проведено сравнение с аналогичными данными для кремниевых мощных диодов Шоттки.

Ключевые слова: карбид кремния, 4H-SiC, диоды Шоттки, одиночные радиационные эффекты отказов, тяжёлые заряженные частицы, область безопасной работы

Сведения об авторах: Полина Сергеевна Громова, psgrom@spels.ru; Александр Сергеевич Тарараксин, astar@spels.ru; Анна Сергеевна Колосова, askol@spels.ru; Дмитрий Владимирович Бойченко, к.т.н., dvboy@spels.ru; Владимир Николаевич Выюгинов, к.ф.-м.н., vvyuginov@yandex.ru; Виктор Викторович Лучинин, к.ф.-м.н., д.т.н., cmid_leti@mail.ru

SUSTAINABILITY AREA OF 4H-SiC SHOTTKY DIODES UNDER THE IMPACT OF HEAVY IONS

P.S. Gromova¹, A.S. Tararaksin², A.S. Kolosova^{1,2}, D.V. Boychenko²,
V.N. Vyuginov³, V.V. Luchinin⁴

¹ National Research Nuclear University MPhI, Moscow;

² Specialized Electronic Systems, Moscow;

³ Svetlana-Elektronpribor JSC; ⁴ Saint Petersburg State Electrotechnical University LETI

Single event radiation failures in foreign 4H-SiC Schottky Diodes with operating voltage from 600 V to 1700 V were experimentally studied. Safe operating area was determined using the effect of a single event burnout caused by outer space heavy charged particles. Results were compared with similar data for silicon power Schottky diodes.

Keywords: Silicon Carbide, 4H-SiC, Schottky diode, single event radiation failure, heavy charged particles, safe operating area

Authors: Polina Sergeevna Gromova, psgrom@spels.ru; Aleksander Sergeevich Tararaskin, astar@spels.ru; Anna Sergeevna Kolosova, askol@spels.ru; Dmitry Vladimirovich Boychenko, Candidate of Engineering Sciences, dvboy@spels.ru; Vladimir Nikolaevich Vyuginov, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, vvyuginov@yandex.ru; Viktor Viktorovich Luchinin, Doctor of Engineering Sciences, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, cmid_leti@mail.ru

Введение

Приборы на основе карбида кремния (SiC) перспективны для применения в экстремальной электронике [1] и имеют ряд преимуществ по сравнению с приборами на основе кремния: низкое сопротивление активной области, низкие потери при переключении, высокую плотность коммутируемой мощности, высокую максимальную рабочую температуру и высокую рабочую частоту [2-4]. В настоящее время наиболее распространены приборы на основе модификации 4H-SiC [5, 6]. В табл. 1 приведены основные электрофизические параметры Si, 4H-SiC и электронной компонентной базы на их основе.

Важным требованием для космических применений SiC приборов является их стойкость к воздействию тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства (КП) в первую очередь по критерию катастрофического отказа (КО). В частности, в диодах Шоттки на 4H-SiC при воздействии ТЗЧ КП проявляются одиночные радиационные эффекты (ОРЭ) пробоя, приводящие к появлению канала утечки тока и необратимому нарушению работоспособности [9, 10].

Стойкость мощных приборов к воздействию ТЗЧ КП характеризуется областью

их безопасной работы (ОБР) – максимальными электрическими смещениями, при которых прибор остаётся работоспособным в процессе и после воздействия.

Повышение стойкости к воздействию ТЗЧ КП происходит при понижении рабочего напряжения диодов (т.н. derating – смягчение режимов применения для повышения устойчивости к внешним воздействиям). Результаты исследований кремниевых диодов Шоттки производства Diodes inc., Vishay и др. [11] показали отсутствие одиночного эффекта пробоя (Single Event Burnout, SEB) при воздействии ТЗЧ КП с линейными потерями энергии (ЛПЭ) вплоть до $60 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ при рабочих напряжениях на уровне 50 % и менее от максимального рабочего напряжения, указанного в спецификации на диод. Согласно [12], стойкость кремниевых МОП транзисторов с рабочими напряжениями от 900 до 1500 В при аналогичном воздействии обеспечивается при снижении рабочего напряжения до 20 % от максимального значения, указанного в спецификации.

Данная работа направлена на уточнение области безопасной работы для мощных высоковольтных диодов Шоттки на 4H-SiC при воздействии ТЗЧ КП.

Таблица 1

Электрофизические параметры приборов на основе Si и 4H-SiC [7, 8]

Параметр	Значение параметра	
	Si приборы	SiC приборы
Максимальное рабочее напряжение, кВ	1,5	6
Напряжённость поля пробоя, МВ/см	0,4	2,7
Максимальная рабочая температура, °С	200	до 900
Теплопроводность, Вт/(см·К)	1,5	4,5

Описание объектов и методов исследований

Схематическое изображение структуры диодов на 4H-SiC представлено на рис. 1.

Рис. 1

Схематическое изображение сечения диода Шоттки

По периметру всей площади контактной области формируется охранный кольцо из кремния p -типа, которое служит для уменьшения краевых токов утечки. Высоколегированные защитные p^+ -области уменьшают значение обратного тока диода за счёт снижения напряжённости электрического поля в непосредственной близости от контакта Шоттки и повышают устойчивость изделия к действию разряда статического электричества. Толщина дрейфового слоя составляет менее 10 % от общей толщины пластины [13]; увеличение толщины области дрейфа приводит к увеличению рабочего напряжения диода.

Исследованные диоды имеют линейную структуру защитных p - n переходов в активной области, а охранные структуры на периферии прибора выполнены в виде плавающих колец (рис. 2).

При положительном смещении электрическое поле и токи распределяются в полупроводнике, как показано на рис. 3. При

наличии электрического смещения (прямого или обратного) модуль напряжённости поля между точками А и С максимальный, поэтому наиболее чувствительной областью (ЧО) к воздействию ТЗЧ является область под защитным p^+ -карманом. Глубина залегания ЧО составляет не более 10 мкм.

Рис. 2

РЭМ-изображение диода производства фирмы Б после удаления металла (вид сверху)

Рис. 3

Линии протекания тока (пунктир) и эквипотенциальные линии диода Шоттки с защитным p - n переходом при прямом смещении; потенциал в точках С анода и p^+ -области одинаков [14]

В качестве объектов исследования выбраны SiC диоды Шоттки иностранного производства: предприятия А – на напряжение 1200 и 1700 В, а также предприятия Б – на напряжения 600, 1200 и 1700 В.

Схема включения образцов при исследованиях представлена на рис. 4. Контроль параметров диодов в процессе и после воздействия проводился с применением измерительного комплекса на платформе National Instruments PXI.

ного, обеспечивающего их безопасную работу при воздействии ТЗЧ КП. Облучение образцов и контроль параметров проводились при температуре среды $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$.

Исследования проводились с использованием испытательного стенда «ИС ОЭ ПП» (Филиал ОАО «ОРКК» – «НИИ КП») на базе циклотрона «У-400М» (ЛЯР ОИЯИ, г. Дубна Московской области). Облучение проводилось ионами ксенона, криптона, аргона или неона. Характеристики ионных

Рис. 4

Схема включения диода при проведении испытаний: ИП – источник питания (Mantigora МТ-60-6Р); А – микроамперметр (мультиметр РХИ-4071 в режиме измерения тока); $C1 = 4,5 \text{ мкФ}$, $C2 = 0,22 \text{ мкФ}$; V – вольтметр (РХИ-4071 в режиме измерения напряжения)

Диоды в процессе облучения находились в электрическом режиме с обратным смещением от максимального (в соответствии с их спецификацией) до понижен-

пучков на поверхности диодов приведены в табл. 2. Зависимости ЛПЭ от пробега (приведён расчёт для кремния) показаны на рис. 5.

Таблица 2

Характеристики ионных пучков испытательного стенда «ИС ОЭ ПП» на базе циклотрона «У-400М» на поверхности

Тип иона	Энергия, МэВ	ЛПЭ, МэВ·см ² /мг	Пробег, мкм
Xe	483,1	69	29
Kr	261,2	40	25
Ar	129,2	16	24
Ne	64,2	6	28

Рис. 5

Зависимости ЛПЭ от пробега в кремнии для используемых ионов, рассчитанные в программе SRIM-2013 (для средних значений энергий ЛПЭ ионов)

Результаты исследований

В процессе воздействия проводилось измерение обратного тока диода и прямого падения напряжения.

Область безопасной работы для каждого значения линейных потерь энергии (ЛПЭ) иона определялась как максимальное значение обратного напряжения $U_{\text{мд}}$, при котором не регистрировался катастрофический отказ – необратимый выход за норму одного или нескольких параметров.

На рис. 6 представлена фотография кристалла изделия после воздействия ТЗЧ КП.

Рис. 6

Фотография кристалла изделия после воздействия ТЗЧ КП

Повреждения в левом верхнем углу наглядно иллюстрируют последствия катастрофического отказа от вторичного пробоя p - n перехода (SEB). Расположение повреждений в первом приближении соответствует границе между активной областью и охранными кольцами.

Области безопасной работы исследованных типов диодов Шоттки для 4 значений ЛПЭ приведены на рис. 7.

В результате проведённого анализа установлено:

1. С увеличением ЛПЭ ионного пучка происходит ожидаемое уменьшение допустимого обратного напряжения на диоде.
2. Диоды Шоттки производства А оказываются более стойкими, чем приборы с аналогичными характеристиками Б.
3. В рамках каждой фирмы-изготовителя наблюдается закономерность: чем

выше заявленное рабочее напряжение диода, тем при меньшей доле рабочего напряжения от максимального обеспечивается устойчивая работа диода в условиях воздействия ТЗЧ.

Типовые требования по значению ЛПЭ для приборов космического применения составляют от 15 до 60 МэВ·см²/мг. При снижении рабочего напряжения на 50 %, как предлагается в [11], отсутствие отказов в исследованных приборах обеспечивается при значениях ЛПЭ менее 10 МэВ·см²/мг. Стойкость диодов Шоттки к воздействию тяжёлых заряженных частиц космического пространства с ЛПЭ до 60 МэВ·см²/мг может быть обеспечена при снижении рабочего напряжения до 10 % от максимального значения, указанного в спецификации (рис. 8).

Рис. 7

Области безопасной работы по критерию ОПЭ КО SiC диодов Шоттки для различных значений ЛПЭ ионов

Рис. 8

Области безопасной работы исследованных диодов Шоттки для различных значений ЛПЭ, нормированные на максимальное рабочее напряжение $U_{\text{макс}}$ согласно спецификациям

Заключение

Стойкость диодов Шоттки к воздействию тяжёлых заряженных частиц космического пространства с ЛПЭ до 60 МэВ·см²/мг может быть обеспечена при снижении рабочего напряжения до 10 % от максимального значения, указанного в спецификации. Тем не менее запас по максимальному напряжению и значимые преимущества SiC технологии перед кремниевой представляют возможность и открывают перспективу применения 4H-SiC диодов Шоттки в космической аппаратуре.

Наблюдаемые различия в радиационном отклике диодов Шоттки при воздействии ТЗЧ КП требуют проведения испытаний каждого типа изделий с целью оценки возможности их применения в целевой аппаратуре.

Благодарности

Авторы выражают благодарность к.т.н. Давыдову Г.Г. (АО «ЭНПО СПЭЛС») за консультации и помощь в организации испытаний, к.т.н. Михайлову А.И. и к.т.н. Афанасьеву А.В. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») за научно-техническую поддержку, предоставленные образцы и полезное обсуждение результатов работы.

Литература

1. Лучинин, В. В. Технологии превосходства. Карбид кремния. Научно-технологический статус ЛЭТИ / В.В. Лучинин // Нано- и микро-системная техника. – 2016. – № 5. – С. 259–271.
2. Влияние облучения быстрыми нейтронами на электрические характеристики приборов на основе CVD эпитаксиальных слоёв 4H-SiC / Калинина Е.В. и др. // Физика и техника

- полупроводников. – 2003. – Т. 37. – Вып. 10. – С. 1260–1264.
3. Калинина, Е. В. Высокотемпературный радиационно стойкий выпрямитель на основе p^+-n -переходов в 4H-SiC, ионно-легированном алюминием / Е.В. Калинина // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44. – Вып. 6. – С. 807–816.
 4. Лебедев, А. А. Радиационная стойкость SiC и детекторы жёстких излучений на его основе / А.А. Лебедев, А.М. Иванов, Н.Б. Строкан // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38. – Вып. 2. – С. 129–150.
 5. Полищук, А. Полупроводниковые приборы на основе карбида кремния – настоящее и будущее силовой электроники / А. Полищук // Компоненты и технологии. – 2004. – № 8 (43). – С. 40–45.
 6. Афанасьев, А. Импортзамещение карбидокремниевой ЭКБ Стратегическое партнёрство СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и ПАО «Светлана» / А. Афанасьев // Наноиндустрия. – 2017. – № 8. – С. 50–60.
 7. Лебедев, А. А. Широкозонные полупроводники для силовой электроники / А.А. Лебедев, В.Е. Челноков // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33. – Вып. 9. – С. 1096–1099.
 8. Konstantinov, A. O. Ionization rates and critical fields in 4H silicon carbide // Appl. Phys. Lett. – 1997. – vol. 71. – no.1. – pp. 90–92.
 9. Javanainen A., Galloway K. F., Nicklaw C., Bosser A. L. Heavy Ion Induced Degradation in SiC Schottky Diodes: Bias and Energy Deposition Dependence // IEEE Trans. Nucl. Sci. – Jan. 2017. – vol. 64. – no. 1. – pp. 415–420.
 10. Kuboyama S. Single-Event Burnout of Silicon Carbide Schottky Barrier Diodes Caused by High Energy Protons // IEEE Trans. Nucl. Sci. – Dec.2007. – vol. 54. – no. 6. – pp. 2379–2383.
 11. Casey M. C., Campola M. J., Lauenstein J.-M., Wilcox E. P., Phan A. M., and LaBel K. A. Silicon Schottky Diode Safe Operating Area // Proc. of NEPP Electronics Technology Workshop (ETW); June 13-16, 2016. – Режим доступа: https://nepp.nasa.gov/workshops/etw2016/talks/13MON/20160613-1600-2016-561-Casey-Final-Pres-NEPPweb-ETW-Schottky-Diodes_TN33313.pdf.
 12. Davydov G. G., Boychenko D. V., Pechenkina D. V., Tararaksin A. S., Kritskaya T. B., Polokhov A. M. Safe Operation Area Of Trench-Gate And Low-Charge Power MOSFET. – Proc. of Conference of Radiation effects on components and systems RADECS-2018. – 16-21 September 2018, Gothenburg, Sweden.
 13. Гавриков, В. Дорогу карбиду кремния! – диоды Шоттки производства Littelfuse / В. Гавриков // Новости электроники. – 2017. – № 4. – С. 17–21.
 14. Kimoto T., Cooper J. A. Fundamentals of Silicon Carbide Technology // IEEE press. – 2014. – pp. 296–297.

References

1. Luchinin V. V. Superior Technologies. Silicon Carbide. Scientific status of Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI'. – // *Nano i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem Engineering]. – 2016. – no.7. – pp. 259–271.
2. The Impact of Fast Neutron Irradiation on the Electrical Characteristics of CVD Epitaxy 4H-SiC Devices // *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov* [Semiconductor Physics and Engineering] – 2003. – vol.37. – i.10. – pp. 1260–1264.
3. Kalinina E. V. High-Temperature Radiation Resistant Rectifier Based on Al Ion-Doped 4H-SiC p^+-n Junction // *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov* [Semiconductor Physics and Engineering]. – 2010. vol.44. – i.6. – pp. 807–816.
4. Lebedev A. A., Ivanov A. M., Strokan N.B. Radiation Hardness of SiC and High-Energy Radiation Detectors on its Basis // *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov* [Semiconductor Physics and Engineering]. – 2004. – vol.38. – i.2. – pp. 129–150.
5. Polishchuk A. SiC-Based Semiconductor Devices - the Present and the Future of Power Electronics // *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies]. – 2004. – no.8 (43). – pp. 40–45.
6. Afanasyev A. Import Substitution of SiC Electronic Components. Strategic Partnership of Electrotechnical University LETI and PJSC Svetlana // *Nanoindustriya* [Nanoindustry]. – 2017. – no.8. – pp. 50–60.

7. Lebedev A. A. Wide-Bandgap Semiconductors in Power Electronics // *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov* [Semiconductor Physics and Engineering]. – 1999. – vol.33. – i.9. – pp.1096-1099.
8. Konstantinov A. O. Ionization rates and critical fields in 4H silicon carbide // *Appl. Phys. Lett.* – 1997. – vol. 71(1). – pp. 90–92.
9. Javanainen A., Galloway K. F., Nicklaw C., Bosser A. L. Heavy Ion Induced Degradation in SiC Schottky Diodes: Bias and Energy Deposition Dependence // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* Jan. –2017. – vol. 64. – no. 1. – pp. 415–420.
10. Kuboyama S. Single-Event Burnout of Silicon Carbide Schottky Barrier Diodes Caused by High Energy Protons // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – Dec.2007. – vol. 54. – no. 6. – pp. 2379–2383.
11. Casey M. C., Campola M. J., Lauenstein J.-M., Wilcox E. P., Phan A. M., and LaBel K. A. Silicon Schottky Diode Safe Operating Area // *Proc. of NEPP Electronics Technology Workshop (ETW)*. 2016; June 13-16, 2016. – Web Access: https://nepp.nasa.gov/workshops/etw2016/talks/13MON/20160613-1600-2016-561-Casey-Final-Pres-NEPPweb-ETW-Schottky-Diodes_TN33313.pdf.
12. Davydov G. G., Boychenko D. V., Pechenkina D. V., Tararaksin A. S., Kritskaya T. B., Polokhov A. M. Safe Operation Area Of Trench-Gate And Low-Charge Power MOSFET // *Proc. of Conference of Radiation effects on components and systems. – RADECS-2018; 16-21 September, 2018. –Gothenburg, Sweden.*
13. Gavrikov V. Make Way for SiC Schottky Diodes by Littlefuse // *Novosti Elektroniki* [Electronics News]. – 2017. – no.4. – pp. 17-21.
14. Kimoto T., Cooper J. A. Fundamentals of Silicon Carbide Technology // *IEEE press.* – 2014. – pp. 296–297.