

УДК 537.31; 621.382.2

PACS: 84.30.Jc; 84.37.+q; 85.30.De

Высоковольтный карбидокремниевый диод Шоттки для применения в области низких температур

С. Б. Рыбалка, А. А. Демидов, Е. А. Кульченков

Экспериментально и теоретически исследованы вольт-амперные характеристики высоковольтного российского карбидокремниевого диода Шоттки 5ДШ410А1 в диапазоне температур от 298 К до температуры жидкого азота. Установлено, что при снижении температуры от 298 К до 78 К значение прямого тока возрастает примерно в два раза (до 211 А), а обратное напряжение достигает ~1450 В. Теоретически описаны прямые и обратные вольт-амперные характеристики при температуре 78 К. Продемонстрирована возможность стабильной работы диода Шоттки 5ДШ410А1 при низких температурах.

Ключевые слова: карбид кремния, диод Шоттки, ВАХ диода, низкие температуры.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-3-49-55

Введение

В настоящее время наиболее исследованными и имеющими массовое использование при работе в области низких температур [1–4] являются устройства электронной компонентой базы на основе кремния (Si). С другой стороны, прогресс в силовой электронике обусловлен разработкой и внедрением устройств на основе широкозонных полупроводников нового поколения (карбид кремния (SiC), нитрид галлия (GaN) и др.) [5–7]. Например, высоковольтные диоды Шоттки на основе карбида кремния представляют собой новое поколение силовых широкозонных полупроводниковых приборов, обладающие максимальными значениями напряжения пробоя и минимальными токами утечки [5–7]. Такие диоды уже серийно производятся в России

(АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» (г. Брянск) [8]) и при этом по основным характеристикам сопоставимы с зарубежными карбидокремниевыми диодами Шоттки [9–11]. Использование диодов Шоттки на SiC способно функционировать при низких температурах, позволит снизить статические и динамические потери в преобразователях электроэнергии, исключить необходимость использования крупногабаритных охладителей, повысить в преобразователях электроэнергии удельный показатель по мощности, повысить КПД преобразователей электроэнергии. Отметим, что систематических исследований работы устройств силовой электроники на SiC в условиях низких температур [5, 6] практически нет, в отличие от тех же устройств на Si [1, 2, 4]. С учетом этого, целью настоящей работы являлось исследование возможности работы производимого серийно российского высоковольтного диода Шоттки на основе карбида кремния в условиях низких температур вплоть до температуры жидкого азота.

Материалы и методы исследований

Материалом для исследования служил высоковольтный диод Шоттки 5ДШ410А1 на основе карбида кремния (политип 4H-SiC)

Рыбалка Сергей Борисович, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: sbrybalka@yandex.ru

Демидов Андрей Александрович, зав. кафедрой, профессор, д.ф.-м.н.

Кульченков Евгений Александрович, ст. преподаватель. Брянский государственный технический университет. Россия, 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7.

Статья поступила в редакцию 24 мая 2022 г.

© Рыбалка С. Б., Демидов А. А., Кульченков Е. А., 2022

серийно выпускаемый предприятием АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» (г. Брянск) [12]. Для исследования вольт-амперных характеристик диода в криогенных условиях применялся криостат, изготовленный из сосуда Дьюара и подложки-радиатора для крепления и термостатирования исследуемого образца диода. В подложку был интегрирован нагреватель для регулирования температуры в диапазоне 77–298 К. Контроль и регулирование температуры осуществлялось на базе комплекса, состоящего из дифференциальной термопары К-типа, измерительного комплекса Fluke 8845A, программируемого источника питания АКПП 1144-160-40. Контроль температуры кристалла диода проводился с помощью предварительно полученного калибровочного графика зависимости термочувствительного параметра (падения напряжения на переходе металл-полупроводник) от температуры термостата для чего в прямом направлении пропускался измерительный импульсный ток малой амплитуды ~ 100 мкА (длительностью импульса ~ 1 мс) с большой скважностью (~ 1000) чтобы протекание измерительного тока не вызывало заметного изменения температуры объекта испытаний. Температурный режим задавался погружением радиатора в жидкий азот, стабилизация температуры на время исследования осуществлялась регулированием тока нагревателя (время выдержки до установления температуры ~ 20 минут). Измерения происходили в импульсном режи-

ме для уменьшения возможного влияния саморазогрева диода. Снятие прямой и обратной вольт-амперной характеристики (ВАХ) осуществлялось анализатором силовых полупроводниковых приборов Keysight B1506A.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования ВАХ карбидокремниевый диода Шоттки 5ДШ410А1 в прямом направлении в интервале температур кристалла диода 78–298 К представлены на рис. 1. Как видно из рис. 1 при понижении температуры от комнатной до температуры жидкого азота при подаче прямого напряжения токи через диод значительно возрастают. Так, например, при температуре 298 К при подаче напряжения 12 В ток составляет 114 А, а при снижении до криогенных температур при температуре 78 К (при том же напряжении 12 В) значение тока достигает 211 А. Таким образом, при понижении температуры до температуры жидкого азота ток через диод 5ДШ410А1 в прямом направлении возрастает практически в 2 раза. Отметим что подобная тенденция наблюдается также для аналогичного по классу зарубежного карбидокремниевый диода Шоттки C4D20120D производимого фирмой CREE, но в интервале более высоких температур 218–448 К и при значительно меньших на порядок токах (до ~ 20 А) [13].

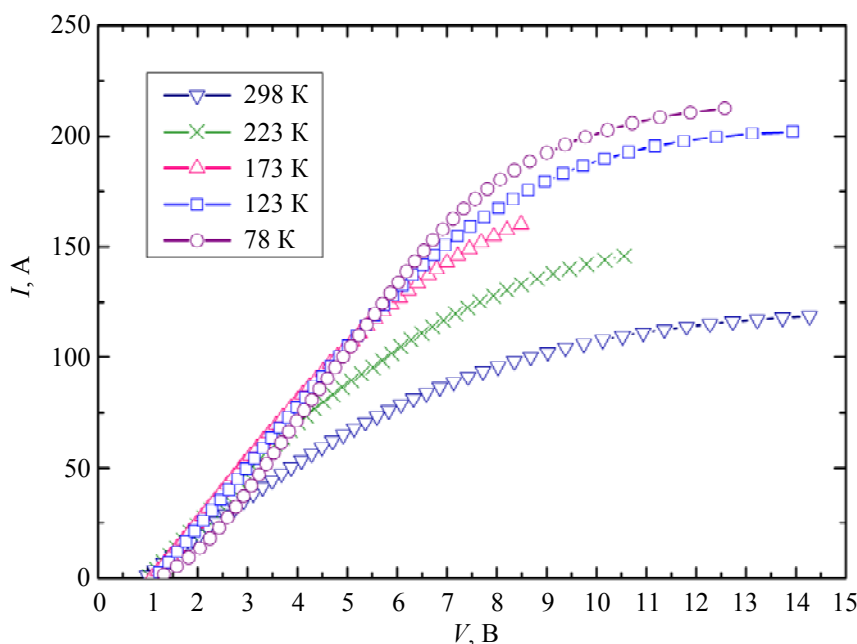


Рис. 1. Прямые вольт-амперные характеристики карбидокремниевый диода Шоттки 5ДШ410А1 при температурах от 78 до 298 К

Таким образом, серийно выпускаемый [12] российский высоковольтный карбидокремниевый диод Шоттки 5ДШ410А1 (АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ») демонстрирует возможность устойчивой работы при до 78 К при значительных прямых токах более 200 А.

Далее были проведены исследования обратной ВАХ карбидокремниевых диода Шоттки 5ДШ410А1 в интервале температур 78–298 К, результаты которых представлены на рис. 2. Из рис. 2 видно что в интервале температур 173–298 К работает устойчиво и пробития диода 5ДШ410А1 не происходит. При снижении температуры до криогенных,

при температуре 78 К наблюдается начало пробоя диода при подаче обратного напряжения ~1450 В. Аналогичная тенденция наблюдается также для сходного по классу зарубежного карбидокремниевых диода Шоттки C4D20120D (CREE), где при более высокой температуре 218 К пробой происходит при ~1500 В [13]. Таким образом, исследования прямых и обратных вольт-амперных характеристик серийно выпускаемого высоковольтного карбидокремниевых диода Шоттки 5ДШ410А1 показали его возможность его стабильной работы в области низких температур вплоть до температуры жидкого азота.

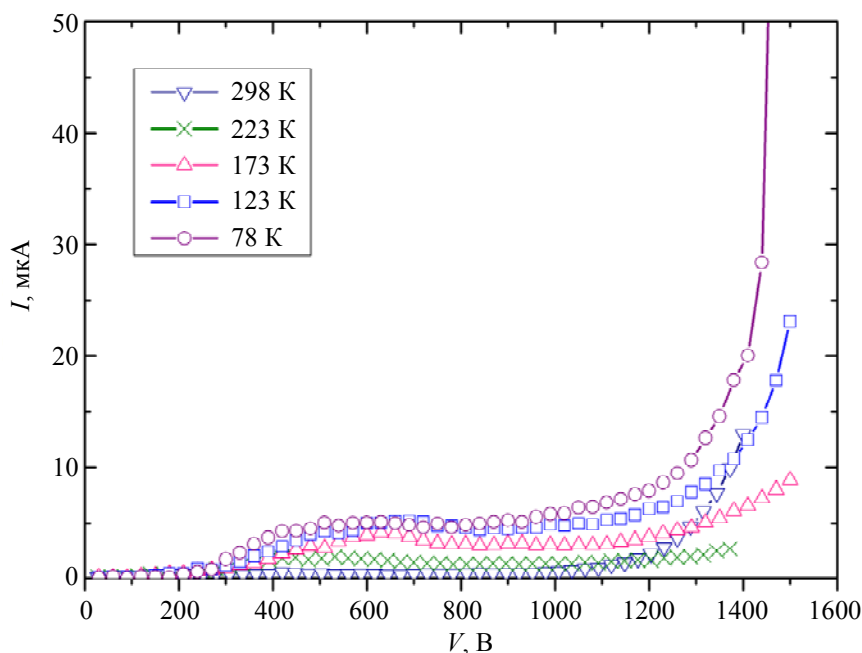


Рис. 2. Обратные вольт-амперные характеристики карбидокремниевых диода Шоттки 5ДШ410А1 при температурах от 78 до 298 К

Полученные результаты прямых вольт-амперных характеристик (рис. 1) были проанализированы в соответствии с классической теорией термоэлектронной эмиссии [2, 5, 14], где зависимость силы прямого тока I от приложенного напряжения V описывается следующим соотношением:

$$I = I_o \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right), \tag{1}$$

где I_o – ток насыщения; q – элементарный заряд; V – напряжение; T – абсолютная температура. В частности, ток насыщения I_o может быть рассчитан по следующей формуле:

$$I_o = SA^*T^2 e^{-\frac{\Phi_B}{kT}} \tag{2}$$

где S – площадь контакта Шоттки; A^* – эффективная константа Ричардсона; Φ_B – высота барьера Шоттки. В приближенном случае для реальных диодов [2, 5, 14], с учетом показателя идеальности диода Шоттки n , прямой ток через диод можно записать в следующем виде:

$$I = I_o \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right). \tag{3}$$

Из уравнения (3), построив зависимость $\ln I$ от приложенного напряжения V , далее были рассчитаны показатели идеальности диода Шоттки n и токи насыщения I_o при температурах эксперимента. Далее, согласно уравнению (2) по методике [2, 14] была построена зависимость $\ln(I_o / T^2)$ от $1/nkT$ для опреде-

ления эффективной высоты барьера Шоттки Φ_B , показанная на рис. 3. Рассчитанное из рис. 3 значение эффективной высоты барьера Шоттки Φ_B составило 1,39 эВ. Полученные расчетные значения высоты барьера Шоттки весьма хорошо коррелируют с известными высотами барьеров, определенными различными методами, для карбидокремниевых диодов Шоттки 4H-SiC с анодом из Ni и Ti, где $\Phi_B \approx 1,2 \div 1,5$ эВ [5, 15].

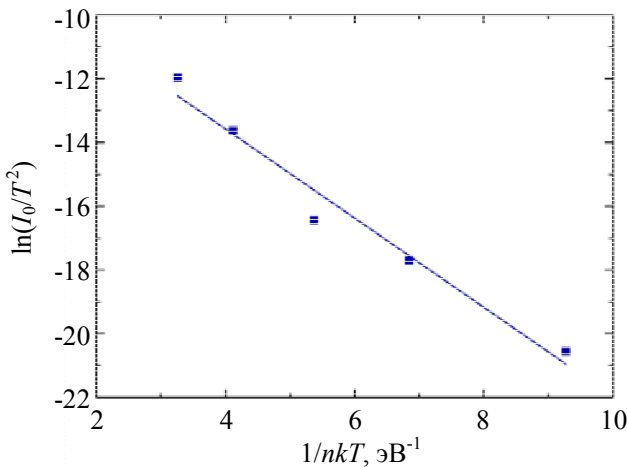


Рис. 3. Зависимость $\ln(I_0/T^2)$ от $1/nkT$ для карбидокремниевых диодов Шоттки 5ДШ410А1

Далее представляло интерес выполнить анализ и теоретический расчет прямой вольт-амперной характеристики диода при криоген-

ных температурах. С этой целью полученные экспериментально прямые ВАХ были аппроксимированы на основе модели термоэлектронной эмиссии из полупроводника в металл с учетом влияния последовательного сопротивления диода R_s [2, 5, 14] в соответствии с которой ток в прямом направлении I_d может быть записан:

$$I_d = SA^*T^2 e^{-\frac{\Phi_B}{kT}} e^{\frac{qV_s}{nkT}}, \quad (4)$$

$$V = V_s + I_d R_s, \quad (5)$$

где S – площадь контакта Шоттки ($S \approx 0,615 \text{ см}^2$), $A^* = 35 \text{ А К}^{-2} \text{ см}^{-2}$ – эффективная константа Ричардсона [16]; $\Phi_B = 1,39$ эВ – высота барьера Шоттки; V_s – падение напряжения на обедненном слое контакта Шоттки; n – коэффициент идеальности диода. Полученные в результате аппроксимации расчеты позволили получить значение коэффициента идеальности диода $n = 1,12$ при высоте барьера Шоттки $\Phi_B = 1,39$ эВ и величине последовательного сопротивления диода $R_s = 37 \text{ мОм}$. Результаты аппроксимации прямой ВАХ диода при $T = 78 \text{ К}$ по уравнениям (4) и (5) с учетом приведенных выше значений последовательного сопротивления диода, коэффициента идеальности и высоты барьера Шоттки показаны на рис. 4.

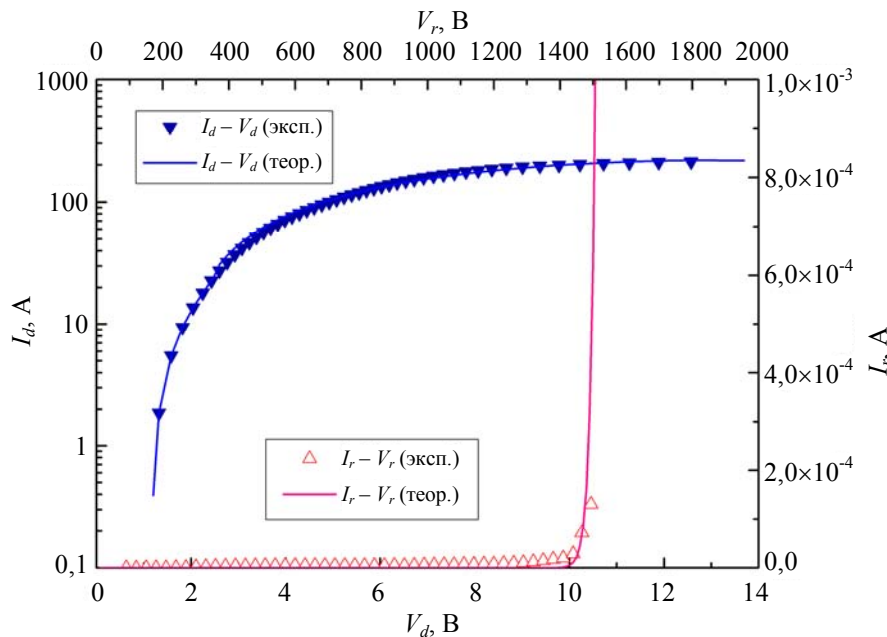


Рис. 4. Экспериментальные и теоретические прямые ($I_d - V_d$) и обратные ($I_r - V_r$) вольт-амперные характеристика карбидокремниевых диодов Шоттки 5ДШ410А1 при температуре $T = 78 \text{ К}$

При описании обратной вольт-амперной характеристики для диода Шоттки [2, 5, 14] имеют место следующие механизмы: электронно-туннельная передача от металла к полупроводнику; тепловая генерация носителей; полевая зависимость высоты барьера. Для механизма полевой зависимости высоты барьера первым механизмом является влияние сил изображения на форму и высоту потенциального барьера (эффект Шоттки [5, 14]), а вторым механизмом является наличие тонкого промежуточного изолирующего слоя между металлом и полупроводником, на котором имеется небольшое падение напряжения, уменьшающее высоту барьера [5, 14, 17].

Как было ранее установлено экспериментально, в диодах Шоттки сформированных в кремнии *n*-типа (ZrSi₂, PtSi и RhSi [18, 19]), обратные характеристики хорошо описываются вторым механизмом, где имеется тонкий промежуточный изолирующий слой между металлом и полупроводником. Указанный выше механизм имеет место и в случае мощных диодов типа 4H-SiC [20]. С учетом полевой зависимости высоты барьера аппроксимирующую формулу для обратного тока I_r от обратного напряжения V_r можно записать [14, 18, 19] в следующем виде:

$$I_r = I_S \exp\left[\frac{\Delta\phi_B(V_r)}{kT}\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{qV_r}{kT}\right)\right], \quad (6)$$

где I_S – ток насыщения; $\Delta\phi_B$ – снижение барьера, вызванное наличием промежуточного слоя; V_r – обратное напряжение; q – элементарный заряд; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура. Ток насыщения I_S можно записать следующим уравнением:

$$I_S = SA^*T^2 e^{-\frac{\Phi_B}{kT}}, \quad (7)$$

где S – суммарная площадь областей Шоттки (0,615 см²); q – элементарный заряд; A^* – эффективная постоянная Ричардсона ($A^* = 35 \text{ A K}^{-2} \text{ cm}^{-2}$ [16]); Φ_B – высота барьера Шоттки (1,39 эВ). Тогда снижение барьера, вызванное наличием промежуточного слоя $\Delta\phi_B$, можно записать [14, 17, 19, 20] в следующем виде:

$$\Delta\phi_B = \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_o\epsilon_r}} + \alpha E_m, \quad (8)$$

где ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость для 4H-SiC ($\epsilon_r = 9,7$); ϵ_{ir} – относительная диэлектрическая проницаемость слоя SiO_x ($\epsilon_{ir} = 2$ [17]); E_m – значение электрического поля на поверхности полупроводника; α – эмпирический параметр [14, 19] определяемый по формуле $\alpha = \delta\epsilon_o\epsilon_r / (\epsilon_o\epsilon_{ir} + q\delta D_s)$, где δ – толщина слоя SiO_x, D_s – энергетическая плотность поверхностных состояний на уровне Ферми в металле. Для случая, когда обратное напряжение существенно превышает изгиб зон в полупроводнике при нулевом смещении, электрическое поле E_m можно выразить через обратное напряжение V_r в следующем виде:

$$E_m = \sqrt{\frac{2qN_D V_r}{\epsilon_o\epsilon_r}}, \quad \text{где } N_D \text{ – концентрация доноров (} 4,75 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}\text{).}$$

На рис. 4 представлена обратная ВАХ диода Шоттки 5ДШ410А1 рассчитанная при температуре 78 К по уравнениям (6)–(8) при толщине слоя SiO_x $\delta = 5$ нм (близких к реальной структуре диода) и энергетической плотности поверхностных состояний на уровне Ферми в металле $D_s = 0,5597 \times 10^{17} \text{ В}^{-1} \text{ м}^{-2}$. Значения толщины естественного оксида δ и плотности состояний D_s весьма близки для аналогичных мощных 4H-SiC Шоттки диодов [20].

Заключение

Экспериментально и теоретически исследованы вольт-амперные характеристики высоковольтного карбидокремниевого диода Шоттки 5ДШ410А1 в диапазоне температур от 298 К до температуры жидкого азота. Из прямых вольт-амперных характеристик установлено, что при снижении температуры от 298 К до температуры 78 К значение прямого тока возрастает примерно в два раза до 211 А. При снижении температуры до 78 К обратное напряжение достигает ~1450 В. Определена высота барьера Шоттки $\Phi_B = 1,39$ эВ. Выполнен расчет прямой вольт-амперные характеристики при температуре 78 К в рамках классической теорией термоэлектронной эмиссии.

Показано что обратная вольт-амперная характеристика при температуре 78 К хорошо описывается с учетом фактора понижения высоты барьера, обусловленного наличием промежуточного слоя в виде естественного окисла SiO_x на поверхности 4H-SiC. Показана возможность устойчивой работы диода Шоттки 5ДШ410А1 при низких температурах вплоть до температуры жидкого азота, что перспективно для использования его в устройствах силовой электроники с криогенным охлаждением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gutierrez-D E. A., Jamal Deen M., Claeys C. Low Temperature Electronics: Physics, Devices, Circuits, and Applications. – San Diego: Academic Press, 2001.
2. Singh R., Baliga B. J. Cryogenic Operation of Silicon Power Devices. – New York: Springer US, 1998.
3. Алфеев В. Н. Радиотехника низких температур. – М.: Советское радио, 1966.
4. Balestra F., Ghibaudo G. Device and Circuit Cryogenic Operation for Low Temperature Electronics. – Boston: Springer US, 2001.
5. Baliga B. J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. – Cham: Springer International Publishing AG, 2019.
6. Белоус А. И., Ефименко С. А., Турцевич А. С. Полупроводниковая силовая электроника. – М.: Техносфера, 2013.
7. Демидов А. А., Рыбалка С. Б. // Прикладная математика & физика. 2021. Т. 53. № 1. С. 53.
8. Гудилин Д. // Электроника НТБ. 2014. № 8. С. 92.
9. Зотин В. Ф., Дракин А. Ю., Рыбалка С. Б., Демидов А. А., Кульченков Е. А. // Прикладная физика. 2021. № 6. С. 67.
10. Rybalka S. B., Kulchenkov E. A., Demidov A. A., Zhemoedov N. A., Drakin A. Yu., Zotin V. F., Shishkina O. A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1679. P. 022045.
11. Sedykh S. V., Rybalka S. B., Drakin A. Yu., Demidov A. A., Kulchenkov E. A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1410. P. 012195.
12. 5ДШ410А1 [Электронный ресурс]. URL: http://group-kremny.ru/catalog/diskretnye-poluprovodniki/diody-i-diodnye-sborki_/5dsh410a1/
13. Cree C4D20120D Silicon Carbide Schottky Diode - Zero Recovery Rectifier, C4D20120D Rev. F, 09-2016 [electronic resource]. URL: <https://assets.wolfspeed.com/uploads/2020/12/C4D20120D.pdf>
14. Rhoderick E. H. Metal-Semiconductor Contacts. – Oxford: Clarendon Press, 1978.
15. Perrone D., Naretto M., Ferrero S., Scaltrito L., Pirri C. F. // Materials Science Forum. 2009. Vol. 615–617. P. 647.
16. Ivanov P. A., Grekhov I. V., Potapov A. S., Samsonova T. P., Il'inskaya N. D., Kon'kov O. I., Serebrennikova O. Yu. // Semiconductors. 2010. Vol. 44. P. 653.
17. Sze S. M., Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. – Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2007.
18. Rhoderick E. H. // IEE Proc. 1982. Vol. 129. № 1. P. 1.
19. Andrews J. M., Lepselter M. P. // Solid-State Electron. 1970. Vol. 13. P. 1011.
20. Ivanov P. A., Grekhov I. V., Kon'kov O. I., Potapov A. S., Samsonova T. P., Semenov T. V. // Semiconductors. 2011. Vol. 45. P. 1374.

PACS: 84.30.Jc; 84.37.+q; 85.30.De

High voltage silicon carbide Schottky diode for low temperature applications

S. B. Rybalka, A. A. Demidov, E. A. Kulchenkov

Bryansk State Technical University
7 50 let Oktyabrya blvd., Bryansk, 241035, Russia

Received May 24, 2022

The current-voltage characteristics of a high-voltage russian silicon carbide Schottky diode 5DSH410A1 have been studied experimentally and theoretically in the temperature range from 298 K to a liquid nitrogen temperature. It has been established that decreasing of temperature from 298 K to temperature of 78 K, the value of the direct current increases approximately twice (up to 211 A) and the reverse voltage reaches ~1450 V. The forward and reverse current-voltage characteristics at a temperature of 78 K have been described theoretically. The possibil-

ity of 5DSH410A1 silicon carbide Schottky diode stable operation under low temperatures is demonstrated.

Keywords: silicon carbide, Schottky diode, current-voltage diagram diode, low temperatures.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-3-49-55

REFERENCES

1. E. A. Gutierrez-D, M. Jamal Deen, and C. Claeys, *Low Temperature Electronics: Physics, Devices, Circuits, and Applications* (Academic Press, San Diego, 2001).
2. R. Singh and B. J. Baliga, *Cryogenic Operation of Silicon Power Devices* (Springer US, New York, 1998).
3. V. N. Alfeev, *Low temperature radio engineering* (Sovetskoe radio, Moscow, 1966) [in Russian].
4. F. Balestra and G. Ghibaudo, *Device and Circuit Cryogenic Operation for Low Temperature Electronics* (Springer US, Boston, 2001).
5. B. J. Baliga, *Fundamentals of Power Semiconductor Devices* (Springer International Publishing AG, Cham, 2019).
6. A. I. Belous, S. A. Efimenko, and A. S. Turtsevich. Semiconductor power electronics (Tekhosfera, Moscow, 2013) [in Russian].
7. A. A. Demidov and S. B. Rybalka, *Applied mathematics & physics* **53** (1), 53 (2021).
8. D. Gudilin, *Elektronika NTB*, No. 8, 92 (2014).
9. V. F. Zotin, A. Yu. Drakin, S. B. Rybalka, A. A. Demidov, and E. A. Kulchenkov. *Applied Physics*, No. 6, 67 (2021) [in Russian].
10. S. B. Rybalka, E. A. Kulchenkov, A. A. Demidov, N. A. Zhemoedov, A. Yu. Drakin, V. F. Zotin, and O. A. Shishkina. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1679**, 022045 (2020).
11. S. V. Sedykh, S. B. Rybalka, A. Yu. Drakin, A. A. Demidov, and E. A. Kulchenkov. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1410**, 012195 (2019).
12. 5DSH410A1 [electronic resource]. URL: http://group-kremny.ru/catalog/diskretnye-poluprovodniki/diody-i-diodnye-sborki_/5dsh410a1/
13. Cree C4D20120D Silicon Carbide Schottky Diode - Zero Recovery Rectifier, C4D20120D Rev. F, 09-2016 [electronic resource]. URL: <https://assets.wolfspeed.com/uploads/2020/12/C4D20120D.pdf>
14. E. H. Rhoderick, *Metal–Semiconductor Contacts* (Clarendon Press, Oxford, 1978).
15. D. Perrone, M. Naretto, S. Ferrero, L. Scaltrito, and C. F. Pirri, *Materials Science Forum* **615–617**, 647 (2009).
16. P. A. Ivanov, I. V. Grekhov, A. S. Potapov, T. P. Samsonova, N. D. Il'inskaya, O. I. Kon'kov, and O. Yu. Serebrennikova, *Semiconductors* **44**, 653 (2010).
17. S. M. Sze and K. Ng. Kwok, *Physics of Semiconductor Devices* (John Wiley & Sons Inc, Hoboken, 2007).
18. E. H. Rhoderick, *IEE Proc.* **129** (1), 1 (1982).
19. J. M. Andrews and M. P. Lepselter, *Solid-State Electron* **13**, 1011 (1970).
20. P. A. Ivanov, I. V. Grekhov, O. I. Kon'kov, A. S. Potapov, T. P. Samsonova, T. V. Semenov, *Semiconductors* **45**, 1374 (2011).