



УДК 537.9

**РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА АНОДА НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДА ШОТТКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ
4H-SiC**

**CALCULATION OF ANODE MATERIAL EFFECT ON CURRENT-VOLTAGE
CHARACTERISTICS OF THE SCHOTTKY DIODE ON THE BASE
OF 4H-SiC SILICON CARBIDE**

**С.Б. Рыбалка, Е.Ю. Краюшкина, А.А. Демидов, А.Ю. Дракин, В.Ф. Зотин
S.B. Rybalka, E.Yu. Krayushkina, A.A. Demidov, A.Yu. Drakin, V.F. Zotin**

Брянский государственный технический университет, Россия, 241035, г. Брянск,
бул. 50 лет Октября, 7

Bryansk State Technical University, 7 50 let Oktyabrya Boulevard, Bryansk, 241035, Russia

E-mail: sbrybalka@yandex.ru

Аннотация

Рассчитана и смоделирована вольт-амперная характеристика диода Шоттки 4H-SiC в прямом и обратном направлении на основе теории термоэлектронной эмиссии и физической аналитической модели, основанной на уравнении Пуассона, уравнений диффузии и непрерывности для различных материалов анода (Ti, W, Mo и Ni).

Abstract

The current-voltage characteristic of the 4H-SiC Schottky diode for forward and reverse current direction has been calculated and simulated on the base of the theory of thermionic emission and a physical analytical model based on the Poisson equation, the diffusive and continuity equations for various anode materials (Ti, W, Mo and Ni).

Ключевые слова: карбид кремния, диод Шоттки, термоэлектронная эмиссия, моделирование.

Keywords: silicon carbide, Schottky diode, thermionic emission, simulation.

Введение

Полупроводниковый материал карбид кремния (SiC) является перспективным для создания приборов силовой электроники, микроэлектроники и оптоэлектроники. Данное обстоятельство связано с большой шириной запрещенной зоны SiC полупроводника (>3 эВ), высокой теплопроводностью, высокими пробивными полями и скоростью насыщения электронов, а также значительной радиационной и термической стабильностью [1]. Одним из наиболее простых приборов на основе SiC, но в то же время важным для микроэлектроники, является диод Шоттки. Например, диоды Шоттки для силовой электроники на основе 4H-SiC уже изготавливаются отечественной промышленностью, в частности, на предприятии ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» (г. Брянск). Очевидно, что для дальнейшего развития отечественной компонентной базы на основе SiC необходимо детальное изучение влияния параметров структуры диода на его вольт-амперные характеристики для оп-



тимизации работы диода Шоттки в силовых приборах электроники, что возможно произвести с использованием физического моделирования [2]. Ранее в работах [3-5] было проведено моделирование прямых и обратных вольт-амперных характеристик карбидокремниевый диода Шоттки на основе политипа 4H с контактом Шоттки из Ti и Ni при различных температурах, были определены высота барьера и коэффициенты идеальности. Целью настоящей работы является исследование влияния материала анода (Ti, W, Mo и Ni) карбидокремниевый диода Шоттки на основе политипа 4H на прямую и обратную вольт-амперные характеристики, при помощи ранее разработанной компьютерной модели.

Материалы и методы исследования

В данной работе была использована физическая модель диода Шоттки [2] в которой решалось уравнение Пуассона с учетом концентрации свободных носителей заряда, уравнения непрерывности для электронов и дырок с учетом зависимости подвижности носителей заряда от концентрации примеси и от напряженности электрического поля, а также учитывалось лавинное умножение носителей заряда [2]. Итоговая система уравнений в сферических координатах для компьютерной модели диода Шоттки имела следующий вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon_r r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (1)$$

$$q^{-1} \nabla \cdot \mathbf{j}_n = -U_n \quad (2)$$

$$q^{-1} \nabla \cdot \mathbf{j}_p = -U_p \quad (3)$$

$$\mathbf{j}_n = n \mu_n \nabla E_c + \mu_n k_B T_l \nabla n \quad (4)$$

$$\mathbf{j}_p = p \mu_p \nabla E_v + \mu_p k_B T_l \nabla p \quad (5)$$

$$E_c = -q(\varphi + \chi) \quad (6)$$

$$E_v = -q(\varphi + \chi + E_g) \quad (7)$$

где r – радиус диода, $\varepsilon_r = 9.7$ – относительная диэлектрическая проницаемость, φ – электростатический потенциал, q – элементарный электрический заряд, n и p – концентрация электронов и дырок, N_D^+ – концентрация донорной примеси, N_A^- – концентрация ионизированных акцепторов, \mathbf{j}_n и \mathbf{j}_p – плотность потока носителей n и p -типа, T_l – термодинамическая температура кристаллической решетки, U_n и U_p – напряжение приложенное к аноду и катоду диода, $\mu_n = 950 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ – подвижность электронов, $\mu_p = 125 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ – подвижность дырок, k_B – постоянная Больцмана, E_c и E_v – энергия зоны проводимости и валентной зоны полупроводника, $E_g = 3.23 \text{ В}$ – ширина запрещенной зоны карбида кремния 4H-SiC, $\chi = 3.7 \text{ В}$ – средство электронов, и в дополнение было учтено, что $N_c = 1.8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ – плотность состояний в зоне проводимости, $N_v = 2.1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ – плотность состояний в валентной зоне в соответствии с данными работ [1,6–7].

Параметры структуры диода Шоттки при моделировании были следующие: концентрация доноров (азот) N_D^+ в подложке составляла $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, в эпитаксиальном слое $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщина эпитаксиального слоя $z=15$ мкм, радиус структуры был равен $r=200$ мкм (Рис. 1).

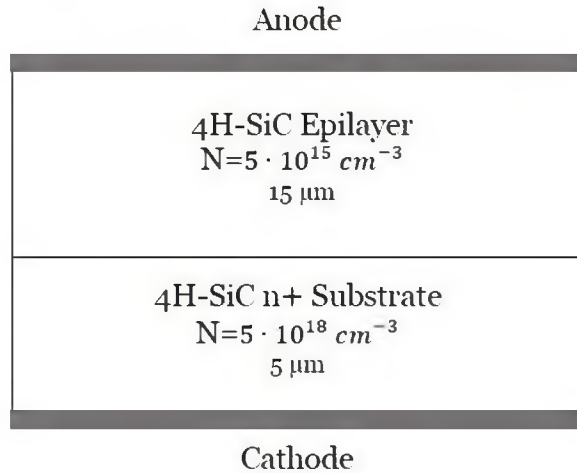


Рис. 1 Схематичная структура диода Шоттки
 Fig. 1 Schematic structure of Schottky diode

Результаты и их обсуждение

Полученные при моделировании в рамках физической модели вольт-амперные характеристики (ВАХ) диода Шоттки 4H-SiC с материалами анода из Ti, W, Mo и Ni представлены на Рис. 2. Результаты для прямой ВАХ 4H-SiC диодов Шоттки (рис. 2а) были проанализированы в соответствии с классической теорией термоэлектронной эмиссии [7], где зависимость силы прямого тока I от приложенного напряжения V для полупроводников описывается следующей формулой:

$$I = I_0 e^{\frac{qV}{nk_B T}} (1 - e^{-\frac{qV}{k_B T}}) \tag{8}$$

где I_0 – ток насыщения (А); T – температура (К); V – приложенное напряжение (В); q – элементарный электрический заряд (Кл); V – прямое напряжение (В); k_B – постоянная Больцмана, (Дж/К); n – коэффициент идеальности диода Шоттки. Ток насыщения I_0 может быть рассчитан по формуле:

$$I_0 = SA^* T^2 e^{-\frac{\phi_B}{k_B T}} \tag{9}$$

где S – площадь контакта Шоттки, [см²]; $A^*=146 \text{ A}/(\text{K}^2 \cdot \text{cm}^2)$ – эффективная константа Ричардсона [1,8]; T – температура (К); ϕ_B – эффективная высота барьера Шоттки (эВ); k_B – постоянная Больцмана (Дж/К). С другой стороны, в упрощенном виде, прямую ВАХ диодов зачастую описывают следующей эмпирической формулой [1,7],

$$I = I_0 (e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1) I_f = I_0 \left[\exp \frac{qV_f}{nkT} - 1 \right] \tag{10}$$

в которой фигурируют следующие эмпирические величины – ток «насыщения» I_0 и коэффициент идеальности n диода. Из уравнения (10), построив для каждой из температур зависимости $\ln(I_0)$ от приложенного напряжения V , нами были рассчитаны показатели идеальности диодов n и токи насыщения I_0 для каждого из диодов Шоттки, показанные в Таблице 1. Далее, согласно распространенной методике [1,6,7], по извлеченным из ВАХ данным была построена зависимость $\ln(I_0/T^2)$ от $1/nkT$ для определения эффективной высоты барьера Шоттки ϕ_B .

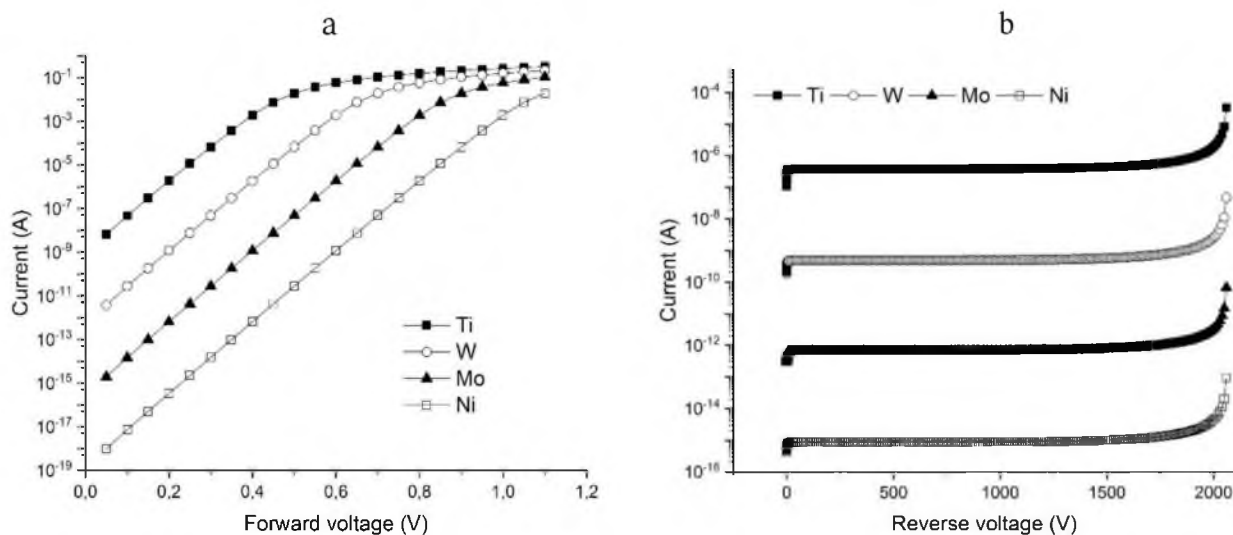


Рис. 2. ВАХ 4H-SiC ДШ в прямом при 300К (а) и в обратном при 350К (б) направлении для различных металлов контакта Шоттки

Fig. 2. Current-voltage characteristics for 4H-SiC Schottky diode for forward current at 300K (a) and reverse current at 350K (b) for various Schottky contact metals

Полученные данные расчетов для коэффициента идеальности n высоты барьера Шоттки ϕ_B для диодов Шоттки с различными металлами были сведены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Коэффициент идеальности и высота барьера Шоттки диода Шоттки 4H-SiC
The ideality coefficient and the Schottky barrier height of the 4H-SiC Schottky diode

Материал анода	Коэффициент идеальности	Высота барьера Шоттки, эВ
Ti	1.099	0.8
W	1.095	0.97
Mo	1.056	1.17
Ni	1.038	1.37

Как видно из табл. 1, значения коэффициентов идеальности диода Шоттки 4H-SiC для различных материалов анода (Ti, W, Mo, Ni) близки к значениям n для «идеального диода» где n равна единице, что весьма важно с практической точки зрения при изготовлении подобных диодов и соответствует тому показателю, который демонстрируют качественные диоды Шоттки на карбиде кремния [1,6]. Помимо этого, полученные из расчетной модели значения высот барьера Шоттки весьма хорошо коррелируют с высотами барьеров приведенными в литературе для диодов Шоттки на основе 4H-SiC [1,9].

По графикам обратных ВАХ (рис. 2b) видно, что лавинный пробой диодов начинается примерно на 2 кВ. Напряжение пробоя несимметричного резкого перехода можно рассчитать [7,8,10] по формуле:

$$V_{\max} = \frac{EW}{2} V_{\max} = \frac{EW}{2} \quad (11)$$

где E – максимальная напряженность электрического поля для карбида кремния (~2,5 МВ/см для 4H-SiC [5]), W – толщина области пространственного заряда. Если считать, что пробой наступает в момент, когда толщина области пространственного заряда примерно равна толщине эпитаксиального слоя ($W=15$ мкм), то расчет по формуле (11) дает



$V_{\max} = 1875B$. Таким образом, рассчитанное теоретическое значение напряжения пробоя довольно точно соответствует результатам, полученным нами на основе физической компьютерной модели.

Заключение

В данной работе методами моделирования было проведено исследование различных материалов анода (Ti, W, Mo, Ni) на вольт-амперные характеристики диода Шоттки на основе политипа 4H-SiC. Установлено, что полученные в модели расчетные высоты барьера Шоттки ϕ_B и коэффициенты идеальности диода n соответствуют практически «идеальному» диоду в рамках теории термоэлектронной эмиссии. Определенные из модели напряжения лавинного пробоя диодов демонстрируют хорошее согласие с рассчитанными теоретически напряжениями пробоя для несимметричного резкого перехода. Таким образом, предложенная модель может быть использована при расчетах вольт-амперных характеристик диодов Шоттки аналогичного типа с контактами Шоттки из различных металлов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ договор № 02.G25.31.020 (участники С.Б. Рыбалка, Е.Ю. Краюшкина, А.А. Демидов) и государственного задания Министерства образования и науки РФ №8.1729.2017/ПЧ (участники: А.Ю. Дракин и В.Ф. Зотин).

Список литературы References

1. Kimoto T., Cooper J. A. 2014. Growth, Characterization, Devices, and Applications. Fundamentals of Silicon Carbide Technology. New York: Wiley-IEEE Press: 539.
2. Bakowski M., Gustafsson U. 1997. Lindefelt U Simulation of SiC High Power Devices Phys. Stat. Sol. (a) 162: 421-440.
3. Рыбалка С.Б., Краюшкина Е.Ю., Хвостов В.А., Демидов А.А. 2016. Моделирование вольт-амперной характеристики диода Шоттки на основе карбида кремния 4H-SiC. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика, 43, № 13(234) : 140-43.
4. Rybalka S.B., Krayushkina E.Yu., Hvastov V.A., Demidov A.A. 2016. Modeling of the current-voltage characteristic of a Schottky diode on the basis of silicon carbide 4H-SiC. Scientific bulletins of the Belgorod State University. Series: Mathematics. Physics, 43, No. 13 (234):140-43
5. Panchenko P.V., Rybalka S.B., Malakhanov A.A., Krayushkina E.Yu., Rad'kov A.V. 2016. I-V characteristics simulation of silicon carbide Ti/4H-SiC Schottky diode. Proc. SPIE "International Conference on Micro- and Nano-Electronics". Vol. 10224:102240Y-1—102240Y-5
5. Rybalka S.B., Krayushkina E.Yu., Demidov A.A., Shishkina O.A., Surin B.P. 2017. Forward current-voltage characteristics simulation of 4H-SiC silicon carbide Schottky diode for power electronics. Int. J. Physical Research: 5-11
6. Ayalew T. 2004 SiC semiconductor devices technology modeling and simulation. PhD Dissertation TU Wien
7. Shur M. 1990. Physics of Semiconductor Devices. New Jersey, Prentice-Hall Int.:704.
8. Zhao J. H., Sheng K. and Lebron-Velilla R. C. 2006. Silicon Carbide Schottky Barrier Diode. SiC materials and devices, ed. by Shur M., Rumyantsev S. and Levinshtein M. World Scientific. Singapore, 1.: 117-162.
9. Itoh A. and Matsunami H. 1997. Schottky Barrier Heights of Metal/SiC Contacts. Phys. stat. sol. (a) 162. (389): 389-408.
10. Sze S.M., Ng Kwok K. 2007. Physics of Semiconductor Devices. New Jersey, John Wiley & Sons Int.: 764.