



УДК 537.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДА ШОТТКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ 4H-SiC**CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS SIMULATION OF THE SCHOTTKY DIODE ON THE BASE OF 4H-SiC SILICON CARBIDE****С.Б. Рыбалка, Е.Ю. Краюшкина, В.А. Хвостов, А.А. Демидов
S.B. Rybalka, E.Yu. Krayushkina, V.A. Khvostov, A.A. Demidov***Брянский государственный технический университет, Россия, 241035, г. Брянск, ул. 50 лет Октября, 7
Bryansk State Technical University, 7, 50 let Oktyabrya Boulevard, Bryansk, 241035, Russia**E-mail: sbrybalka@yandex.ru*

Аннотация. Вольт-амперная характеристика диода Шоттки 4H-SiC с контактом Шоттки из Ni в прямом направлении была рассчитана и смоделирована на основе теории термоэлектронной эмиссии и физической аналитической модели основанной на уравнении Пуассона, уравнений диффузии и непрерывности. Показано что прямая вольт-амперная характеристика в рамках предложенной модели диода Шоттки соответствует «неидеальному» диоду в рамках теории термоэлектронной эмиссии с высотой барьера Шоттки $\phi_B = 1.4\text{эВ}$ с коэффициентом идеальности диода Шоттки $n = 1.37$.

Resume. Forward current-voltage characteristics of 4H-SiC Schottky diode with Ni Schottky contact based on thermionic emission theory and simulation in the physical analytical models based on Poisson's equation, drift-diffusion and continuity equations has been calculated and simulated. It is shown that forward current-voltage characteristics in terms of the proposed the simulation model of Schottky diode corresponds to the "non-ideal" diode in terms of the thermionic emission theory with Schottky barrier height $\phi_B = 1.4\text{eV}$ with ideality factor of Schottky diode $n = 1.37$.

Ключевые слова: диод, Шоттки, карбид кремния, моделирование, термоэлектронная эмиссия.
Key words: diode, Schottky, silicon carbide, simulation, thermionic emission.

Введение

Карбид кремния (SiC) является перспективным полупроводниковым материалом для создания приборов микроэлектроники и оптоэлектроники. Это связано с большой шириной запрещенной зоны полупроводника, высокой теплопроводностью, высокими пробивными полями и скоростью насыщения электронов, а также значительной радиационной и термической стабильностью. Исследования карбида кремния как материала для полупроводниковой электроники начались в Ленинграде (С.-Петербурге) в ФТИ им. А. Ф. Иоффе в тридцатых годах прошлого века [1]. С тех пор были разработаны прототипы целого ряда полупроводниковых приборов на основе SiC: диодов Шоттки, полевых транзисторов, р-і-п диодов и др. В настоящее время весьма перспективным материалом для изготовления высоковольтных диодов Шоттки является политип карбида кремния 4H-SiC, который предпочтительнее остальных используемых политипов карбида кремния (3C, 2H-SiC, 6H-SiC и др.) для силовых полупроводников благодаря высокой подвижности основных носителей и относительно небольшими величинами энергии активации легирующих примесей [1].

Подобные диоды Шоттки для силовой электроники на основе карбида кремния 4H-SiC были разработаны совместно ФТИ им. А. Ф. Иоффе и компанией Cree Inc. (США) и уже производятся,



а в перспективе будут впредь изготавливаться и на отечественных заводах, в частности, на заводе ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» (г. Брянск). Очевидно что для развития отечественной компонентной базы для силовой электроники необходимо изучение и оптимизация электрических характеристик диода Шоттки на основе SiC.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе проведено моделирование вольт-амперной характеристики в прямом направлении для диода Шоттки на основе политипа 4H-SiC. Для расчета электрических характеристик диода Шоттки применялась классическая термоэмиссионно-диффузионная теория [2], учитывающая электрон-фононное взаимодействие, квантовомеханическое туннелирование носителей через барьер и уменьшение высоты барьера под влиянием сил изображения. Для моделирования вольт-амперной характеристики диода Шоттки была использована физическая аналитическая модель решения уравнений переноса заряда на основе уравнения Пуассона совместно с уравнениями диффузии и уравнениями непрерывности [3].

Результаты и их обсуждение

В соответствии с классической теорией термоэлектронной эмиссии [2] для прямой ветви вольт-амперной характеристики зависимость силы прямого тока I от приложенного напряжения V для полупроводников описываются следующей формулой:

$$I = I_o e^{\frac{qV}{nk_B T}} (1 - e^{-\frac{qV}{k_B T}}) \quad (1)$$

где I_o – ток насыщения [А], T – абсолютная температура [К], V – приложенное напряжение [В], q – элементарный электрический заряд [Кл], k_B – постоянная Больцмана [Дж/К], n – коэффициент идеальности диода Шоттки.

Ток насыщения определяется в соответствии с теорией термоэлектронной эмиссии [2]:

$$I_o = SA^* T^2 e^{-\frac{\Phi_B}{k_B T}} \quad (2)$$

где S – площадь контакта Шоттки, [см²]; A^* – эффективная константа Ричардсона, [А/(К²·см²)]; T – температура, [К]; Φ_B – эффективная высота барьера Шоттки, [эВ]; k_B – постоянная Больцмана, [Дж/К].

Для компьютерной модели вольт-амперной характеристики диода Шоттки, концентрации носителей заряда, распределения электрических полей решалось электростатическое уравнение Пуассона совместно с уравнениями переноса заряда, связывающими концентрацию носителей заряда и электрическое поле [2,3]. В частности, предполагали, что в предельном случае статистика Ферми-Дирака может быть аппроксимирована распределением Максвелла-Больцмана, а подвижности носителей и коэффициенты диффузии могут быть описаны уравнениями Эйнштейна. Итоговая система уравнений имела для компьютерной модели диода Шоттки следующий вид [3]:

$$\nabla(\epsilon_r \nabla V) = q(n - p - N_D^+) \quad (3)$$

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{j}_n = -V_n \quad (4)$$



$$\frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{j}_p = -V_p \quad (5)$$

$$\mathbf{j}_n = n\mu_n \nabla E_c + \mu_n k_B T_l \nabla n \quad (6)$$

$$\mathbf{j}_p = p\mu_p \nabla E_v + \mu_p k_B T_l \nabla p \quad (7)$$

$$E_c = -q(V + \chi) \quad (8)$$

$$E_v = -q(V + \chi + E_g) \quad (9)$$

где $\varepsilon_r = 9.7$ – относительная диэлектрическая проницаемость, n и p – концентрация электронов и дырок, $N_D^+ = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ – концентрация донорной примеси, $N_c = 1.7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ – плотность состояний в зоне проводимости, $N_v = 2.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ – плотность состояний в валентной зоне, $E_g = 3.23 \text{ В}$ – ширина запрещенной зоны карбида кремния 4H-SiC, \mathbf{j}_n и \mathbf{j}_p – плотность потока носителей n и p -типа, $\chi = 3.7 \text{ В}$ – сродство электронов, $\mu_n = 800 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ – подвижность электронов, $\mu_p = 115 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ – подвижность дырок в соответствии с данными [1–3]. Граничные условия между металлическими контактами и слоем 4H-SiC и на боковой поверхности цилиндра задавались стандартные для диода Шоттки [2].

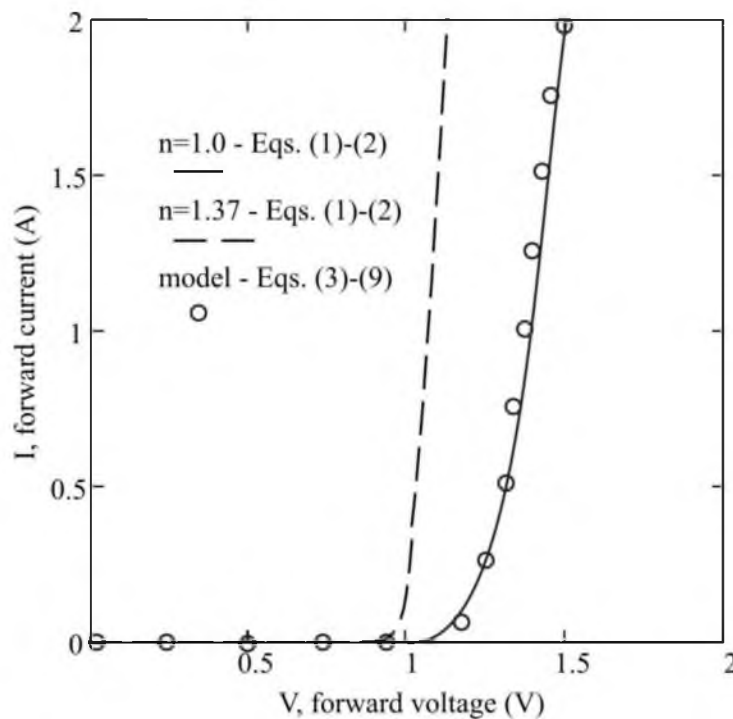


Рис. 1. Прямая вольт-амперная характеристика для Ni/4H-SiC диода Шоттки.
Fig. 1. Forward current-voltage characteristics for Ni/4H-SiC Schottky diode.

Для расчета силы прямого тока I от приложенного напряжения V в рамках теории термоэлектронной эмиссии в соответствии с уравнениями (1) и (2) использовали данные: $A^* = 146 \text{ A}/(\text{K}^2 \cdot \text{см}^2)$ – эффективная константа Ричардсона [4–7], $T = 298 \text{ K}$ – температура, $\phi_B = 1.4 \text{ эВ}$ – эффективная высота барьера Шоттки в соответствии с данными [4–7]. В качестве модели диода Шоттки использовали цилиндр радиусом $R = 2.54 \text{ мм}$, состоящий из слоя карбида кремния 4H-SiC высотой $h = 254 \text{ мкм}$, контакта Шоттки из Ni и омического контакта. Результаты



расчетов в рамках классической теории термоэлектронной эмиссии по уравнениям (1)–(2) и численных расчетов компьютерной модели по уравнениям (3)–(9) представлены на Рисунке 1.

Как видно из рис. 1, результаты компьютерной модели диода Шоттки качественно удовлетворительно описывают вольт-амперную характеристику диода Ni/4H-SiC в прямом направлении, однако не совпадают с вольт-амперной характеристикой для случая «идеального» диода Шоттки с коэффициентом идеальности $n = 1.0$. При этом, результаты вольт-амперной характеристики диода в рамках теоретического анализа на основе теории термоэлектронной эмиссии и компьютерной физической моделью диода Шоттки совпадают при условии того, что коэффициент идеальности диода Шоттки n должен быть равен 1.37 (при высоте барьера Шоттки равном 1.4 эВ), что примерно соответствует экспериментально наблюдаемому значению для карбида-кремниевый диода Шоттки типа 4H-SiC с контактом Шоттки из Ni [6].

Заключение

В настоящей работе была рассчитана и смоделирована вольт-амперная характеристика диода Шоттки 4H-SiC с контактом Шоттки из Ni была на основе теории термоэлектронной эмиссии и физической аналитической модели основанной на уравнении Пуассона, уравнениях диффузии и непрерывности. Показано что прямая вольт-амперная характеристика в рамках предложенной компьютерной модели диода Шоттки соответствует «неидеальному» диоду в рамках теории термоэлектронной эмиссии с высотой барьера Шоттки $\phi_B = 1.4 \text{ эВ}$ с фактором идеальности диода Шоттки $n = 1.37$. Таким образом, предложенная модель в дальнейшем успешно может быть использована для проектирования и расчета диодов Шоттки на основе других политипов карбида кремния (3C, 2H-SiC, 6H-SiC и др.) с контактами Шоттки из других металлов (Ti, Mo, Pt и др.).

Работа выполнена в рамках комплексного проекта при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (договор № 02.G25.31.0201).

Список литературы References

1. Ivanov P.A., Levinshtein M.E., Mnatsakanov T.T., Palmour J.W., Agarwal A.K. 2005. Power bipolar devices based on silicon carbide. *Semiconductors*, 39 (8) : 861–877.
2. Shur M. 1990. *Physics of Semiconductor Devices*. New Jersey, Prentice–Hall Int., 704.
3. Sze S.M., Ng Kwok K. 2007. *Physics of Semiconductor Devices*. New Jersey, John Wiley & Sons Int., 764.
4. Mnatsakanov T.T., Pomortseva L.I., Yurkov S.N. 2001. Semiempirical model of carrier mobility in Silicon Carbide for analyzing its dependence on temperature and doping level. *Semiconductors*, 35 (4) : 394–397.
5. Akira Itoh, Tsunenobu Kimoto, Hiroyuki Matsunami. 1995. High performance of high-voltage 4H-SiC Schottky barrier diodes. *IEEE Electron Device Letters*, 16 (6) : 280–282.
6. Potapov A.S., Ivanov P.A., Samsonova T.P. 2009. Effect of annealing on the effective barrier height and ideality factor of nickel Schottky contacts to 4H-SiC. *Semiconductors*, 43 (5) : 612–616.
7. Zhao J.H., Sheng K., Lebron-Velilla R.C. Silicon Carbide Schottky Barrier Diode. 2006. In: *SiC materials and device*. Singapore, World Scientific: 117–162.