

Основан в 1995 г.

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

**Учредитель**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

**Издатель**

НИУ «БелГУ»

Издательский дом «Белгород»

Адрес редакции, издателя, типографии:  
308015 г. Белгород, ул. Победы, 85

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-63055 от 10 сентября 2015 г.

Выходит 4 раза в год.

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ ЖУРНАЛА****Главный редактор серии**

*А.В. Носков*, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой теоретической и математической физики НИУ «БелГУ»

**Заместитель главного редактора**

*Н.В. Малай*, доктор физико-математических наук, профессор НИУ «БелГУ»

**Ответственный секретарь**

*Р.А. Загороднюк*, кандидат физико-математических наук, доцент НИУ «БелГУ»

**Члены редколлегии:**

*А. Ашъралиев*, доктор физико-математических наук, профессор факультета математики Ближневосточного университета (Никосия, Турция); институт математики и математического моделирования (Алматы, Казахстан)

*С.В. Блажевич*, доктор физико-математических наук, профессор НИУ «БелГУ»

*А.Н. Беляков*, доктор физико-математических наук, профессор НИУ «БелГУ»

*И.П. Борисовский*, кандидат физико-математических наук, доцент НИУ «БелГУ»

*А.Г. Брусенцев*, доктор физико-математических наук, профессор БГТУ им. В.Г. Шухова

*В.Б. Васильев*, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой дифференциальных уравнений НИУ «БелГУ»

*Ю.П. Вирченко*, доктор физико-математических наук, профессор НИУ «БелГУ»

**СОДЕРЖАНИЕ****МАТЕМАТИКА**

<b>В.А. Полунин, А.П. Солдатов</b> Система Моисила – Теодореску в области, гомеоморфной тору .....	5
<b>С.И. Митрохин</b> Спектральные свойства многоточечной краевой задачи для дифференциального оператора нечётного порядка с суммируемым потенциалом .....	10
<b>М.В. Кукушкин</b> Теорема об ограниченном вложении энергетического пространства порожденного оператором дробного дифференцирования в смысле Маршо на оси .....	24
<b>А.В. Авилов</b> Оценки Гельфанда-Шилова для экспоненты оператора конечного ранга ...	31
<b>В.И. Дмитриев, Л.И. Студеникина, Т.В. Шевцова</b> Об абсолютно кальдероновых элементах банаховой пары $(I_1, c_0)$ .....	34
<b>Ж.А. Балкизов</b> Смешанная задача для уравнения парабола-гиперболического типа третьего порядка с производными второго порядка в граничных условиях .....	40
<b>А.В. Глушак</b> Априорная оценка решения задачи Дирихле для дифференциального уравнения высокого порядка с двумя вырождающимися эллиптическими операторами .....	50

**ФИЗИКА**

<b>В.С. Захвалинский, А.Н. Хмара, Л.В. Борисенко</b> Механизмы проводимости в поверхностных слоях, полученных анодированием кремния .....	58
<b>S.V. Blazhevich, A.Z. Ligidov, A.A. Mazilov, S.N. Nemtsev, A.V. Noskov</b> Diffracted transition radiation of a beam of relativistic electrons in a thin single-crystal plate .....	70
<b>С.Е. Савотченко</b> Локализованные состояния в дефокусирующей нелинейной среде с дефектом с внутренней структурой .....	79
<b>А. Красных, И.А. Милойчикова, Ю.М. Черепенников, С.Г. Стучебров</b> Пространственное распределение мощности дозы тормозного излучения бетатрона Обь-4 .....	86
<b>С.Б. Рыбалка, Е.Ю. Краюшкина, А.А. Демидов, А.Ю. Дракин, В.Ф. Зотин</b> Расчет влияния материала анода на вольт-амперные характеристики диода Шоттки на основе карбида кремния 4H-SiC .....	93

<i>А.В. Глушаков</i> , доктор физико-математических наук, профессор НИУ «БелГУ»	<b>А.С. Деев, С.К. Киприч, Г.П. Васильев, М.Ю. Шулика, А.А. Мазилев</b> Детектирующая система на основе Si детекторов и Gd конвертера для регистрации тепловых нейтронов .....	98
<i>С.Б. Дабагов</i> , доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электронов высоких энергий ОЯФА ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН	<b>Е.Е. Майоров, А.Ч. Машек, Г.А. Цыганкова, Г.Г. Хайдаров, А.Г. Хайдаров, В.К. Абрамян, Ю.Е. Зайцев</b> Разработка колориметрического датчика с RGB-элементом и двухполостной оптоэлектронной интегрирующей сферой для контроля диффузно отражающих объектов .....	107
<i>Д.М. Левин</i> , доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики Тульского государственного университета	<b>Н.В. Камышанченко, А.В. Гальцев, В.А. Беленко</b> Исследование процессов двойникования в титане ВТ1-0 после механико-термического воздействия .....	116
<i>О.М. Пенкин</i> , доктор физико-математических наук, профессор (Казахстанско-британский технический университет, центр математики и кибернетики Алматы, Казахстан)	<b>МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ</b>	
<i>И.П. Половинкин</i> , доктор физико-математических наук, профессор кафедры математического и прикладного анализа факультета прикладной математики, информатики и механики Воронежского государственного университета	<b>С.V. Blazhevich, E.S. Kaviyeva, Yu.P. Gladkih</b> Image super-resolution method based on a hole array mask usage .....	123
<i>С.М. Ситник</i> , доктор физико-математических наук, профессор НИУ «БелГУ»	<b>Н.Н. Ушакова, В.Н. Винтаев</b> Итеративный оператор деконволюции в вариантах модели формирования изображения со сверхразрешением в группировке космических аппаратов .....	131
<i>А.П. Солдатов</i> , доктор физико-математических наук, профессор НИУ «БелГУ»	<b>Т.С. Кумыков</b> Математическое моделирование динамики облачных капель во фрактальной облачной среде с учетом эффекта нагрева .....	146
<i>В.Е. Федоров</i> , доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой математического анализа математического факультета Челябинского государственного университета	<b>О.А. Гальцева</b> Микроскопическое описание процесса диффузии примеси из водоема в упругий пористый грунт .....	151
<i>А.А. Шибков</i> , доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина	<b>Ю.П. Вирченко, А.В. Субботин</b> О совпадении классов спектрально обратимых и Гамильтоновых автономных динамических систем .....	163
	<b>Сведения об авторах</b> .....	167

Статьи представлены в авторской редакции.

Выпускающий редактор *Л.П. Котенко*  
Художественный редактор *Ю.В. Ивахненко*

Оригинал-макет *А.В. Носков*  
E-mail: noskov\_a@bsu.edu.ru

Подписано в печать 21.09.2017  
Формат 60×84/8  
Гарнитура Times New Roman, Impact  
Усл. п. л. 21,3.  
Заказ 219  
Цена свободная  
Тираж 1000 экз.  
Дата выхода 30.09.2017

Подписной индекс в Объединённом каталоге «Пресса России» – 81631

Оригинал-макет подготовлен и тиражирован в Издательском доме «Белгород»

Адрес: 308015 г. Белгород, ул. Победы, 85

№ 20 (269), Issue 48

September 2017

SCIENTIFIC PEER-REVIEWED JOURNAL

Founded in 1995

The Journal is included into the list of the leading peer-reviewed journals and publications coming out in the Russian Federation that are recommended for publishing key results of the theses for Doktor and Kandidat degree-seekers.

Belgorod State University  
Scientific Bulletin

Mathematics & Physics

НАУЧНЫЕ ВЕДОМОСТИ

Белгородского государственного университета

Математика Физика

**Founder**

Federal state autonomous educational establishment of higher education «Belgorod State National Research University»

**Publisher**

Belgorod State National Research University  
Belgorod Publishing House  
Address of editorial office, publisher, letterpress plant: 85 Pobeda St., Belgorod, 308015, Russia

The journal has been registered at the Federal service for supervision of communications information technology and mass media (Roskomnadzor)

Mass media registration certificate  
ПИ № ФС 77-63055 September 10, 2015 г.

Publication frequency: 4 /year

**EDITORIAL BOARD OF JOURNAL SERIES**

**Chief editor**

A. V. Noskov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Theoretical and Mathematical Physics (Belgorod State National Research University)

**Deputies of chief editor**

N. V. Malay, Professor (Belgorod State National Research University)

**Editorial assistant**

R. A. Zagorodnyuk, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, assistant professor, (Belgorod State National Research University)

**Members of editorial board:**

A. Ashyralyev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Mathematic faculty of Near East University (Nicosia, Turkey), Institute of Mathematic and Mathematical Modeling (Almaty, Kazakhstan)

S. V. Blazhevich, Professor (Belgorod State National Research University)

A. N. Belyakov, Professor (Belgorod State National Research University)

I. P. Borisovsky, Associated Professor (Belgorod State National Research University)

A. G. Brusentsev, Professor (Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov)

V. B. Vasiliev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Differential Equations

U. P. Virchenko, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Belgorod State National Research University)

**CONTENTS**

**MATHEMATICS**

<b>V.A. Polunin, A.P. Soldatov</b> The Moisil-Teodorescu system in the area, homeomorphic to a torus ....	5
<b>S.I. Mitrokhin</b> Spectral properties of multipoint boundary problem for differential operator of odd order with summable potential .....	10
<b>M.V. Kukushkin</b> Theorem about bounded embedding of the energetic space generated by the operator of fractional differentiation in the sense of Marchaud on the axis .....	24
<b>A.V. Avilov</b> Gelfand-Shilov evaluations for exponent of finite rank operators .....	31
<b>V.I. Dmitriev, L.I. Studenikina, T.V. Shevtsova</b> On absolute calderon's elements of banach pair $(l_1, c_0)$ .....	34
<b>Zh.A. Balkizov</b> Mixed problem for equation of parabolic-hyperbolic type of the third order derivative to second order in boundary conditions .....	40
<b>A.V. Glushak</b> A priori estimate of the solution of the Dirichlet problem for a high order differential equation with two degenerating elliptic operators .....	50

**PHYSICS**

<b>V.S. Zakhvalinskii, A.N. Khmara, L.V. Borisenko</b> Mechanisms of conductivity in surface layers obtained by silicon anodization .....	58
<b>S.V. Blazhevich, A.Z. Ligidov, A.A. Mazilov, S.N. Nemtsev, A.V. Noskov</b> Diffracted transition radiation of a beam of relativistic electrons in a thin single-crystal plate .....	70
<b>S.E. Savotchenko</b> Localized states in a defocusing nonlinear medium with a defect with an internal structure .....	79
<b>A.A. Krasnykh, I.A. Miloichikova, Yu.M. Cherepennikov, S.G. Stuchebrov</b> Spatial distribution of OB-4 betatron bremsstrahlung dose rate .....	86
<b>S.B. Rybalka, E.Yu. Krayushkina, A.A. Demidov, A.Yu. Drakin, V.F. Zotin</b> Calculation of anode material effect on current-voltage characteristics of the Schottky diode on the base of 4H-SiC silicon carbide .....	93
<b>O.S. Deiev, S.K. Kiprich, G.P. Vasiliev, M.Yu. Shulika, A.A. Mazilov</b> Detection system based on Si detectors and Gd converter for thermal neutrons registration .....	98

A.V. Glushak, Professor (Belgorod State National Research University)

S.B. Dabagov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of the Electron Laboratory high energy of Department of Nuclear Physics and Astrophysics of Physical Institute of Russian Academy of Sciences after P.N. Lebedev

D.M. Levin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Physics (Tula State University)

O.M. Penkin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Kazakh-British Technical University, Center for Mathematics and Cybernetics, Almaty, Kazakhstan)

I.P. Polovinkin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Mathematical and Applied Analysis of the Faculty of Applied Mathematics, Informatics and Mechanics (Voronezh State University)

S.M. Simik, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Belgorod State National Research University)

A.P. Soldatov, Professor (Belgorod State National Research University)

V.E. Fedorov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Mathematical Analysis of Mathematical Faculty (Chelyabinsk State University)

A.A. Shibkov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Experimental Physics (Tambov State University after G.R. Derzhavin)

**E.E. Maiorov, A.C. Mashek, G.A. Tsygankova, A.G. Khaidarov, G.G. Khaidarov, V.K. Abramian, Y.E. Zaitsev**

Development of the colorimetric sensor with an RGB element and a bicameral optoelectronic integrating sphere to control the diffusely reflecting objects ..... 107

**N.V. Kamyshanchenko, A.V. Gal'tsev, V.A. Belenko**

Research of the processes of twinning in titanium BT1-0 after mechanics-thermal effects ..... 116

## **MATHEMATICAL PHYSICS. MATHEMATICAL MODELING**

**S.V. Blazhevich, E.S. Kaviyeva, Yu.P. Gladkih**

Image super-resolution method based on a hole array mask usage ..... 123

**N.N. Ushakova, V. N. Vintaev**

Iterative deconvolution operator in the model imaging with superresolution in the constellation of spacecraft ..... 131

**T.S. Kumykov**

Mathematical modeling of the dynamics of cloud droplets in the fractal cloud environment taking into account the effect of heating ..... 146

**O.A. Galtseva**

Microscopic description of the diffusion process of water immunization in elastic porous soil ..... 151

**Yu.P. Virchenko, A.V. Subbotin**

About equivalence of spectral reversible and Hamiltonian dynamical system ..... 163

**Information about Authors** ..... 167

The articles are given in authors' editing.

Commissioning Editor *L.P. Kotenko*  
Art editor *Y.V. Ivakhnenko*

Dummy layout by *A.V. Noskov*  
E-mail: noskov\_a@bsu.edu.ru

Passed for printing 21.09.2017  
Format 60×84/8  
Typeface Times New Roman, Impact  
Printer's sheets 21,3.  
Order 219  
Circulation 1000 copies  
Date of publishing: 30.09.2017

Subscription reference in The Russian Press  
common catalogue – 81631

Dummy layout is replicated at Publishing House  
«Belgorod», Belgorod State  
National Research University  
Address: 85 Pobeda St., Belgorod, 308015,  
Russia



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,  $\varphi$  – 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 зоне полупроводника,  $E_g = 3.23 \text{ В}$  – ширина запрещенной зоны карбида кремния 4H-SiC,  $\chi = 3.7 \text{ В}$  – сродство 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).

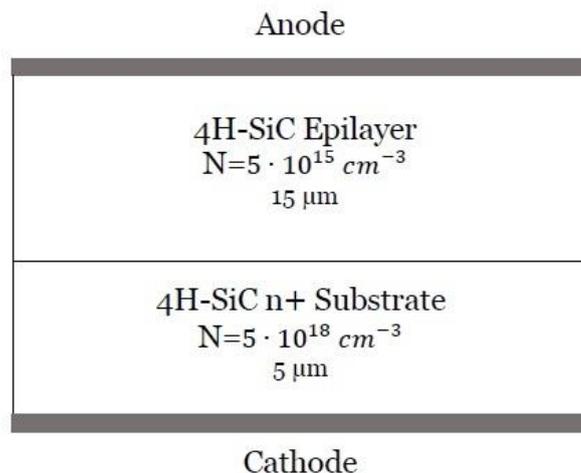


Рис. 1 Схематичная структура диода Шоттки  
 Fig. 1 Schematic structure of Schottky diode

### 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:

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

где  $I_o$  – 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  $I_o$  может быть рассчитан по формуле:

$$I_o = SA^* T^2 e^{-\frac{\phi_B}{k_B T}} \quad (9)$$

где  $S$  – площадь контакта Шоттки, [см<sup>2</sup>];  $A^* = 146$  А/(К<sup>2</sup>·см<sup>2</sup>) – эффективная константа Ричардсона [1,8];  $T$  – температура (К);  $\phi_B$  – 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],

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

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

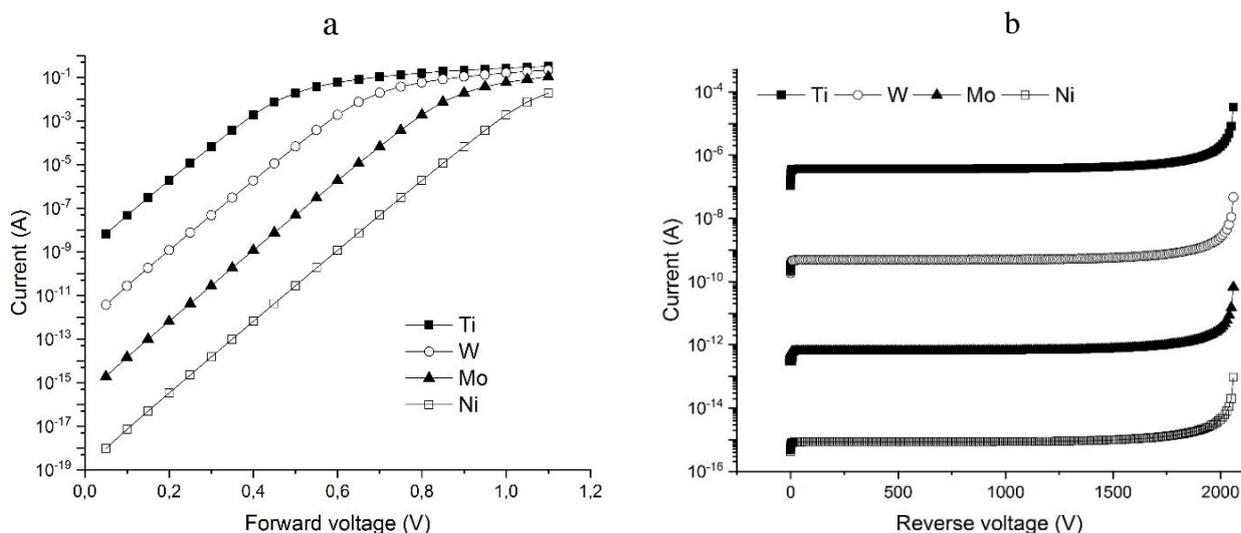


Рис. 2. ВАХ 4H-SiC ДШ в прямом при 300К (а) и в обратном при 350К (б) направлении для различных металлов контакта Шоттки  
 Fig. 2. Current-voltage characteristics for 4H-SiC Schottky diode for forward current at 300K (a) and reverse current at 350K (b) for various Schottky contact metals

Полученные данные расчетов для коэффициента идеальности  $n$  высоты барьера Шоттки  $\phi_B$  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 ( $\sim 2,5$  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



$V_{\max} = 1875V$ . 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  $\phi_B$  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., Hvostov 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.