



Прикладная математика & Физика

2020. Том 52, № 1

Основан в 1995 г. Журнал включен в Перечень ВАК рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (01.01.01 – вещественный, комплексный и функциональный анализ, 01.01.02 – дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление, 01.04.07 – физика конденсированного состояния). Ранее журнал издавался под названием «Научные ведомости Белгородского государственного университета. Математика. Физика».

УЧРЕДИТЕЛЬ:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор: В. Б. Васильев, доктор физико-математических наук, НИУ «БелГУ»;
Заместители главного редактора: С. М. Ситник, доктор физико-математических наук, НИУ «БелГУ», Математика; А. В. Носков, доктор физико-математических наук, НИУ «БелГУ», Физика. Математическое моделирование;
Ответственный секретарь: О. В. Чернова, кандидат физико-математических наук, НИУ «БелГУ».

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Ю. А. Алхутов, д-р физ.-мат. наук, Владимир, Россия;
А. Ашыралыев, д-р физ.-мат. наук, Алматы, Казахстан;
С. В. Блажевич, д-р физ.-мат. наук, Белгород, Россия;
А. Н. Беляков, д-р физ.-мат. наук, Белгород, Россия;
А. Г. Брусенцев, д-р физ.-мат. наук, Белгород, Россия;
Ю. П. Вирченко, д-р физ.-мат. наук, Белгород, Россия;
А. В. Глушак, д-р физ.-мат. наук, Белгород, Россия;
С. Б. Дабагов, д-р физ.-мат. наук, Москва, Россия;
А. Н. Куликов, д-р физ.-мат. наук, Ярославль, Россия;
Д. М. Левин, д-р физ.-мат. наук, Тула, Россия;
И. С. Ломов, д-р физ.-мат. наук, Москва, Россия;
В. В. Меньших, д-р физ.-мат. наук, Воронеж, Россия;
А. И. Назаров, д-р физ.-мат. наук, Санкт-Петербург, Москва;
Е. Ю. Панов, д-р физ.-мат. наук, Великий Новгород, Россия;
О. М. Пенкин, д-р физ.-мат. наук, Алматы, Казахстан;
И. П. Половинкин, д-р физ.-мат. наук, Воронеж, Россия;
Е. В. Радкевич, д-р физ.-мат. наук, Москва, Россия;
А. П. Солдатов, д-р физ.-мат. наук, Москва, Россия;
В. Е. Федоров, д-р физ.-мат. наук, Челябинск, Россия;
М. В. Шитикова, д-р физ.-мат. наук, Воронеж, Россия;
А. А. Шибков, д-р физ.-мат. наук, Тамбов, Россия.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Выходит 4 раза в год.

Выпускающий редактор: Л. П. Котенко	Гарнитура Times.
Корректурa: Ю. В. Ивахненко	Дата выхода 30.03.2020.
Компьютерная верстка: О. В. Чернова	Оригинал-макет подготовлен подготовлен отделом
Оригинал-макет: В. Б. Васильев	объединенной редакции научных журналов НИУ «БелГУ»
E-mail: vasilyev_v@bsu.edu.ru	308015 г. Белгород, ул. Победы, 85.

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

- М. С. Апанович, А. П. Ляпин, К. В. Шадрин*
Вычисление последовательности главных миноров теплицевой ленточной матрицы **5**
- Е. С. Чеб, Е. С. Симинская*
О классическом решении смешанной задачи для линейного нестроого гиперболического уравнения четвертого порядка с одной кратной характеристикой **11**
- В. В. Щербина*
О двух задачах теории частично тотально композиционных формаций конечных групп **18**

ФИЗИКА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Е. А. Кульченков, С. Б. Рыбалка, А. А. Демидов, А. Ю. Дракин*
Расчет характеристик карбидокремниевых диодов Шоттки для малогабаритных металлополимерных корпусов **33**
- Д. А. Тукмаков*
Численное исследование влияния объемного содержания дисперсной компоненты газозвеси на интенсивность межфазного скоростного скольжения при разлете газозвеси в вакуум **41**



Applied Mathematics & Physics

2020. Volume 52, № 1

Founded in 1995. The journal is included into the List of Higher Attestation Commission of peer-reviewed scientific publications where the main scientific results of dissertations for obtaining scientific degrees of a candidate and doctor of science should be published (01.01.01 – material, complex and functional analysis, 01.01.02 – differential equations, dynamical systems and optimal control, 01.04.07 – condensed matter physics). Previously, the magazine was published under the title «Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics. Physics».

FOUNDER:

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

EDITORIAL BOARD:

Chief Editor: V. B. Vasiluev, Dr.Sc., Ph.D., Belgorod National Research University;
Deputy Editor-in-Chief: S. M. Sitnik, Dr.Sc., Ph.D., Belgorod National Research University, Mathematics;
A. V. Noskov, Dr.Sc., Ph.D., Belgorod National Research University, Physics. Mathematical modeling;
Executive Secretary: O. V. Chernova, PhD, Belgorod National Research University.

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Yu. A. Alkhutov, Dr.Sc., Ph.D., Vladimir, Russia;
A. Ashyralyev, Dr.Sc., Ph.D., Almaty, Kazakhstan;
S. V. Blazhevich, Dr.Sc., Ph.D., Belgorod, Russia;
A. N. Belyakov, Dr.Sc., Ph.D., Belgorod, Russia;
A. G. Brusentsev, Dr.Sc., Ph.D., Belgorod, Russia;
Yu. P. Virchenko, Dr.Sc., Ph.D., Belgorod, Russia;
A. V. Glushak, Dr.Sc., Ph.D., Belgorod, Russia;
S. B. Dabagov, Dr.Sc., Ph.D., Moscow, Russia;
A. N. Kulikov, Dr.Sc., Ph.D., Yaroslavl, Russia;
D. M. Levin, Dr.Sc., Ph.D., Tula, Russia;
I. S. Lomov, Dr.Sc., Ph.D., Moscow, Russia;
V. V. Menshih, Dr.Sc., Ph.D., Voronezh, Russia;
A. I. Nazarov, Dr.Sc., Ph.D., St. Petersburg, Russia;
E. Yu. Panov, Dr.Sc., Ph.D., Velikiy Novgorod, Russia;
O. M. Penkin, Dr.Sc., Ph.D., Almaty, Kazakhstan;
I. P. Polovinkin, Dr.Sc., Ph.D., Voronezh, Russia;
E. V. Radkevich, Dr.Sc., Ph.D., Moscow, Russia;
A. P. Soldatov, Dr.Sc., Ph.D., Moscow, Russia;
V. E. Fedorov, Dr.Sc., Ph.D., Chelyabinsk, Russia;
M. V. Shitikova, Dr.Sc., Ph.D., Voronezh, Russia;
A. A. Shibkov, Dr.Sc., Ph.D., Tambov, Russia.

The journal has been registered at the Federal service for supervision of communications information technology and mass media (Roskomnadzor). Publication frequency: 4 /year.

Commissioning Editor L. P. Kotenko
Proofreading Yu. V. Ivakhnenko
Computer imposition O. V. Chernova
Dummy layout by V. B. Vasilyev
E-mail: vasilyev_v@bsu.edu.ru

Typeface Times.
Date of publishing 30.03.2020.
The layout is presented by Department of the united
Editorial Board of Scientific Journals Belgorod
National Research University
Address: 85 Pobeda St., Belgorod, 308015, Russia

CONTENTS

MATHEMATICS

- M. S. Apanovich, A. P. Lyapin, K. V. Shadrin***
Calculating the sequence of main minors of the toeplitz band matrix **5**
- E. S. Cheb, E. S. Siminskaya***
Classical solution of the mixed problem for linear nonstrictly hyperbolic fourth-order with multiple chatacteristic **11**
- V. V. Shcherbina***
On two problems of the theory of partially totally composition formations of finite groups **18**

PHYSICS. MATHEMATICAL MODELING

- E. A. Kulchenkov, S. B. Rybalka, A. A. Demidov and A. Yu. Drakin***
Calculation of characteristics of the silicon carbide schottky diodes for small metalpolymeric package **33**
- D. A. Tukmakov***
Numerical study of the influence of volume content of a dispersed gas-suspension component on the intensity of an interphasic speed sliding during gas-suspension split in vacuum **41**

ФИЗИКА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 537.9; 621.382

DOI 10.18413/2687-0959-2020-52-1-33-40

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК КАРБИДОКРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ ШОТТКИ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОРПУСОВ

Е. А. Кульченков, С. Б. Рыбалка*, А. А. Демидов, А. Ю. Дракин

Статья представлена членом редакционной коллегии А. В. Носковым

Брянский государственный технический университет,
г. Брянск, 241035, Россия

*E-mail: sbrybalka@yandex.ru

Аннотация. Выполнен расчет характеристик охранной системы карбидокремниевых 4H-SiC диодов Шоттки с использованием метода физического моделирования и установлены оптимальные конфигурации (уровни легирования и толщины эпитаксиального слоя 4H-SiC) структуры диода для получения высоких значений пробивного напряжения. Установлено, что оптимальная структура диода Шоттки, пригодного для монтажа в современные малогабаритные металлополимерные корпуса (SOT, QFN), соответствует диоду с концентрацией доноров в эпитаксиальном слое 4H-SiC $3,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщиной слоя 18 мкм, и системой из шести охранных $p+$ колец и слоем JTE.

Ключевые слова: диод Шоттки, SiC, карбид кремния, малогабаритный полимерный корпус.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства № 075-11-2019-035 в организации головного исполнителя НИОКТР ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Для цитирования: Кульченков Е. А., Рыбалка С. Б., Демидов А. А., Дракин А. Ю. 2020. Расчет характеристик карбидокремниевых диодов Шоттки для малогабаритных металлополимерных корпусов. Прикладная математика & Физика. 52(1): 33–40. DOI 10.18413/2687-0959-2020-52-1-33-40.

CALCULATION OF CHARACTERISTICS OF THE SILICON CARBIDE SCHOTTKY DIODES FOR SMALL METALPOLYMERIC PACKAGE

E. A. Kulchenkov, S. B. Rybalka*, A. A. Demidov, A. Yu. Drakin

Article submitted by a member of the editorial board A. V. Noskov

Bryansk State Technical University,
Bryansk, 241035, Russia

*E-mail: sbrybalka@yandex.ru

Received March 12, 2020

Abstract. The characteristics of the guard system of the 4H-SiC silicon carbide Schottky diodes with used the physical simulation method and optimal configurations (levels of doping and thickness of the 4H-SiC epitaxial layer) of the diode structure for obtaining of high values of the breakdown voltage have been calculated. It is established that the optimum structure of the Schottky diode for installation in modern small metalpolymeric package (SOT, QFN) corresponds to the diode with concentration of donors in 4H-SiC epitaxial layer $3,75 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, thickness of epitaxial layer of 18 microns and a system from six $p+$ guard rings and JTE layer.

Key words: Schottky diode, SiC, silicon carbide, small metalpolymeric package.

Acknowledgements: The work is supported by financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of a comprehensive project to create high-tech production N 075-11-2019-035 in the organization of the lead researcher R&D FSBEI HE «Bryansk State Technical University».

For citation: Kulchenkov E. A., Rybalka S. B., Demidov A. A., Drakin A. Yu. 2020. Calculation of characteristics of the silicon carbide Schottky diodes for small metalpolymeric package. Applied Mathematics & Physics. 52(1): 33–40 (in Russian). DOI 10.18413/2687-0959-2020-52-1-33-40.

1. Введение. В настоящее время в США, Европе и Юго-Восточной Азии работы в области силовой электроники, как на основе традиционного кремния (Si), так и с использованием широкозонного полупроводникового материала нового поколения карбида кремния (SiC), ведутся очень

бурными темпами [Kang, 2014; Розанов, 2018; Рыбалка и др., 2018(a); Kimoto, Cooper, 2014; Kimoto, Yonezawa, 2018; Baliga, 2019]. Область применения изделий силовой электроники весьма широка (установки индуктивного нагрева, частотные преобразователи, преобразователи электроэнергии с мягкой коммутацией, бесконтактные коммутаторы устройств импульсного электропитания, автомобильная электроника, железнодорожные модули питания, РЛС и др.). При этом тенденция миниатюризации современных изделий электронной техники обуславливает повышенный спрос на изделия в малогабаритных корпусах для поверхностного монтажа [Kang, 2014; Lu, Wong, 2017]. В настоящее время малогабаритные металлополимерные корпуса имеют ряд существенных достоинств, например, в случае сложных схем – это повышение степени интеграции и многофункциональности при снижении объема, массы и стоимости устройств; а в случае однофункциональных схем – возможность миниатюризации аппаратуры в условиях массовой сборки [Kang, 2014; Розанов, 2018; Kimoto, Cooper, 2014; Lu, Wong, 2017]. Разработка и использование новых методов корпусирования позволило компаниям Northrop Grumman Space Technology [Chang-Chien et al., 2006] и Avago Technologies [Ingram, 2008] получить высокопроизводительные СВЧ-микросхемы, используемые как в системах связи (WiFi 802.11a/b/g/n, WLAN, WiMax и др.), так и в сложной специальной технике (РЛС, радиосистемы и др.). При этом большая часть зарубежных микросхем и полупроводниковых приборов аналогичного класса, используемых в микро- и радиоэлектронных российских изделиях, конструктивно оформлены в широко используемых сейчас за рубежом современных малогабаритных корпусах типа SOT (SOT-23, SOT-223, SOT-323) и др. [Lu, Wong, 2017]. Между тем, в последние годы на российском рынке силовой электроники появилась и продолжает расти потребность в изделиях микроэлектронной техники на кремнии и на карбиде кремния в корпусах, отсутствующих в стандартной линейке. Это, в первую очередь, необходимо для выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, ведущихся в рамках программ по импортозамещению. Однако в России предприятия, производящие корпусирование, проектировались еще в советское время и строились с расчетом на выпуск больших серий корпусов (относительно несложных, с малым количеством выводов), а отдельные типы современных малогабаритных корпусов типа SOT (Small Outline Transistor), QFN (Quad Flat No Leads package), SO (Small Outline) и др. вообще не предполагалось производить. К настоящему моменту производство устройств силовой электроники в малогабаритных металлополимерных корпусах освоено несколькими зарубежными компаниями: Texas Instruments, ST Microelectronics, Microsemi, Infineon Technologies, Avago Technologies и др. [Kimoto, Yonezawa, 2018; Lu, Wong, 2017; Chang-Chien et al., 2006]. При этом SiC приборы в малогабаритных корпусах представлены на мировом рынке в гораздо меньшем ассортименте и объемах. К примеру, компания Microsemi только недавно начала выпускать SiC MOSFET на SiC в корпусах типа SOT [Silicon, 2018], а мировой лидер силовой электроники на SiC компания Wolfspeed (Cree Company) в корпусе типа QFN (PowerQFN) производит всего лишь один карбидокремниевый диод Шоттки [C3D1P7060Q, 2015]. Сведения об особенностях применяемых зарубежными компаниями технологий изготовления в открытой печати отсутствуют, так как практически все технологии содержат секреты производства («ноу-хау»). Диоды Шоттки для силовой электроники на основе 4H-SiC уже изготавливаются отечественной промышленностью, в частности, на предприятии АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» (г. Брянск), однако монтаж их производится в крупногабаритные корпуса транзисторного типа (ТО-220 и др.). Ранее, в наших предыдущих работах были исследованы характеристики 4H-SiC диодов Шоттки с контактами Шоттки анода Ni и Ti без охранных колец [Panchenko et al., 2016; Panchenko et al., 2017], 4H-SiC МОП транзисторы [Иванов и др., 2017] и влияние структуры диода на пробивное напряжение [Sedykh et al., 2018], которые затем были использованы для их монтажа в крупногабаритные корпуса транзисторного типа (ТО-220 и др), продемонстрировавшие достаточно высокие характеристики по параметру dV/dt , сравнимые с зарубежными диодами [Sedykh et al., 2019; Рыбалка и др., 2018(b)].

С учетом изложенного выше, цель данной работы состоит в том, чтобы исследовать характеристики карбидокремниевых диодов Шоттки с использованием метода физического моделирования с возможностью последующего их монтажа в современные малогабаритные металлополимерные корпуса (SOT, QFN). Решение данной задачи позволит значительно повысить степени интеграции и многофункциональности выпускаемых изделий микроэлектронной техники, а также обеспечит возможность миниатюризации аппаратуры, собранной на их базе.

2. Материалы и методы исследования. В данной работе для реализации поставленной цели была использована физическая модель диода Шоттки, 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 [Bakowski, Gustafsson, 1997]. Для вычислений использовалась программная среда TCAD и описанные нами ранее методы [Panchenko et al., 2016; Panchenko et al., 2017; Sedykh et al., 2019; Рыбалка и др., 2017].

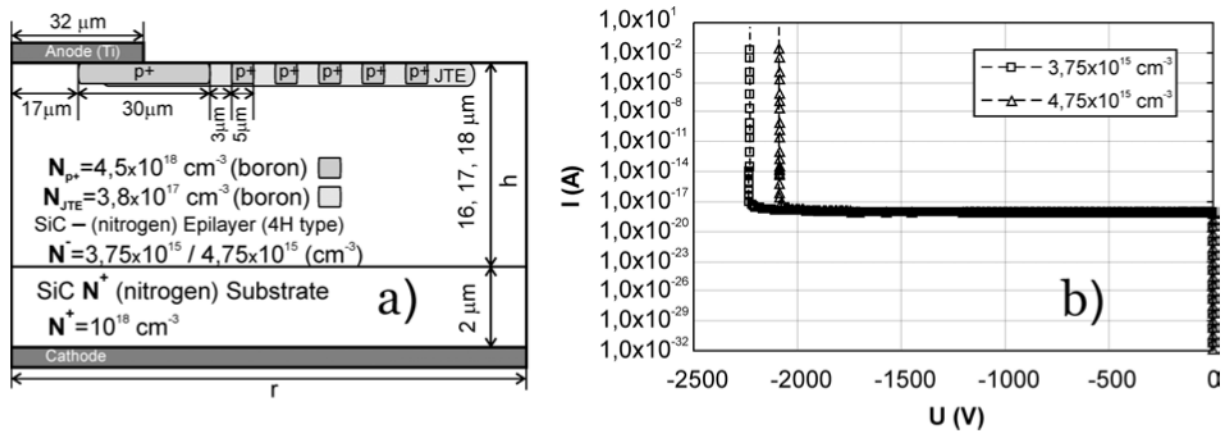


Рис. 1. а) структура карбидокремниевого диода Шоттки для расчета; б) рассчитанная обратная вольт-амперная характеристика диода Шоттки типа 4Н-SiC при различных концентрациях эпитаксиального слоя 4Н-SiC – $3,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $4,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$

Fig. 1. a) structure of silicon carbide Schottky diode for calculation; б) calculated reverse current-voltage characteristics of 4H-SiC type Schottky diode at various concentrations of 4H-SiC epitaxial layer – $3,75 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $4,75 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

В соответствии с поставленной задачей размеры диода Шоттки выбирались таким образом, чтобы имелась возможность в последующем монтировать их в современные малогабаритные металлополимерные корпуса (SOT, QFN), при этом диод должен устойчиво работать с рабочим напряжением до 1200 В. Параметры структуры диода Шоттки, детально показанные на рис. 1. а), при моделировании были следующие: концентрация доноров (азот) N^+ в подложке составляла $1,0 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, в эпитаксиальном слое N^- концентрации были выбраны $3,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $4,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщина эпитаксиального слоя h варьировалась от 16 до 18 мкм, радиус структуры был равен $r=120$ мкм, материал анода – титан (Ti).

Для повышения величины пробивного напряжения диода использовалась структура охранных колец состоящая из шести охранных колец, (p^+ -типа), где ширина первого кольца составляла 30 мкм и пять остальных шириной 5 мкм, отстоящих друг от друга на расстоянии 3 мкм с концентрацией доноров p^+ -типа (бор) $N_{p^+}=4,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и дополнительным защитным слоем JTE (Junction Terminate Extension), сформированным имплантацией бора с концентрацией $N_{JTE}=3,8 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, выходящим на 10 мкм за край последнего охранный p^+ кольца. Расчеты производились при температуре 300 К.

3. Результаты и их обсуждение. Для получения планарных p - n -переходов на карбиде кремния основной технологией является имплантация примесей (бора, алюминия) где глубина залегания переходов варьируется в пределах 0,5–1,5 мкм. Напряжение пробоя планарного перехода определяется концентрацией примеси в эпитаксиальном слое, толщиной эпитаксиального слоя и радиусом скругления p - n -переходов, определяемых их глубиной залегания [Рыбалка и др., 2018(а); Kimoto, Cooper, 2014; Baliga, 2019]. С целью повышения напряжения пробоя планарного перехода на карбиде кремния применяют систему делительных колец, которая повышает радиус скругления планарного перехода при подаче обратного напряжения [Kang, 2014; Kimoto, Cooper, 2014; Baliga, 2019]. При этом зазоры между основным переходом и первым кольцом, а также между кольцами выбирают одинаковыми и подбираются таким образом, чтобы область пространственного заряда основного и делительных переходов последовательно смыкалась по мере увеличения напряжения на аноде диода. В нашем случае использовалась система охранных колец, состоящая из имплантированных бором (В) шести охранных колец (p^+ -типа), где ширина первого кольца составляла 30 мкм и пяти остальных шириной 5 мкм с зазором между кольцами 3 мкм, а также дополнительным защитным слоем JTE (рис. 1. а).

Как отмечалось выше, одним из основных параметров, определяющим величину напряжения пробоя карбидокремниевых диодов Шоттки – является концентрация доноров N^- в эпитаксиальном слое 4Н-SiC [Kang, 2014; Kimoto, Cooper, 2014; Kimoto, Yonezawa, 2018; Baliga, 2019]. Поэтому, для выбора оптимальной концентрации доноров в эпитаксиальном слое 4Н-SiC были выполнены предварительные расчеты напряжения пробоя планарного p - n перехода при различных их концентрациях.

С учетом вышесказанного для диода были изначально выбраны концентрации доноров в эпитаксиальном слое 4Н-SiC, равные $3,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $4,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, соответственно, при этом толщина эпитаксиального слоя h оставалась неизменной и равной 16 мкм. Полученные при численном моделировании обратные вольт-амперные характеристики диода Шоттки 4Н-SiC представлены на

рис. 1б. При концентрации доноров в эпитаксиальном слое 4Н-SiC равной $3,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ пробой диода произошел при подаче обратного напряжения 2232 В, как следует из Рис. 1б. При увеличении концентрации доноров в эпитаксиальном слое до $4,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ пробой диода произошел при напряжении 2085 В (см. рис. 1б). Таким образом, увеличение концентрации доноров в эпитаксиальном слое с $3,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ до $4,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ привело к весьма существенному (148 В) снижению величины напряжения пробоя диода Шоттки. С учетом полученного результата, дальнейшие расчеты 4Н-SiC диода Шоттки были выполнены при концентрации доноров в эпитаксиальном слое с $3,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Как ранее было установлено [Baliga, 2019; Sedykh et al., 2018], имеется возможность существенно повысить значение напряжения пробоя 4Н-SiC диода Шоттки если увеличить толщину эпитаксиального слоя 4Н-SiC. Дальнейшие расчеты были выполнены при концентрации доноров в эпитаксиальном слое $3,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и увеличенной толщине эпитаксиального слоя 4Н-SiC до 17 и 18 мкм.

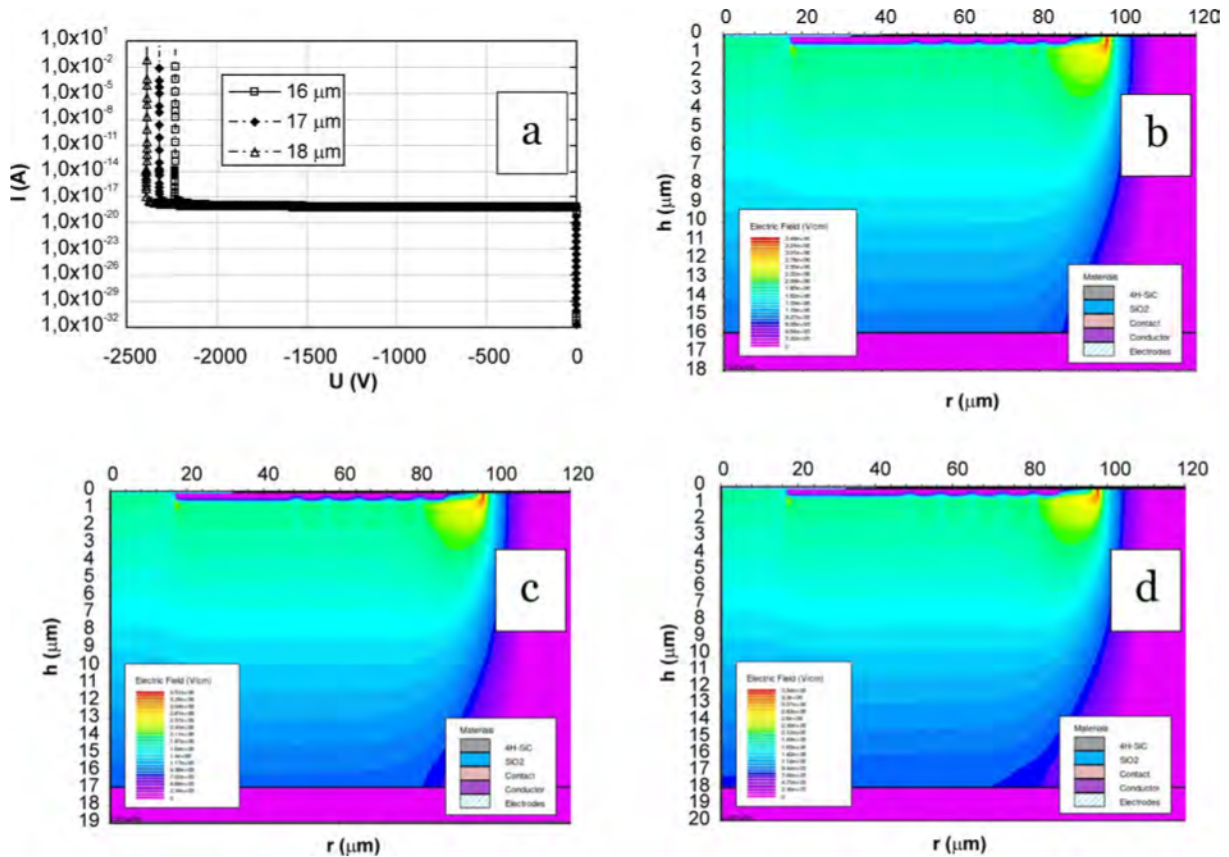


Рис. 2. а) рассчитанная обратная вольт-амперная характеристика диода Шоттки с концентрацией эпитаксиального слоя 4Н-SiC $3,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и различной толщиной эпитаксиального 4Н-SiC слоя – 16, 17 и 18 мкм; б) распределение электрического поля диода Шоттки с толщиной эпитаксиального 4Н-SiC слоя 16 мкм; в) распределение электрического поля диода Шоттки с толщиной эпитаксиального 4Н-SiC слоя 17 мкм; д) распределение электрического поля диода Шоттки с толщиной эпитаксиального 4Н-SiC слоя 18

МКМ

Fig. 2. а) calculated reverse current-voltage characteristics of 4H-SiC type Schottky diode with concentration of 4H-SiC epitaxial layer $3,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ and various thickness of 4H-SiC epitaxial layer – 16, 17 and 18 μm ; б) electric field distribution of Schottky diode with thickness of 4H-SiC epitaxial layer equals 16 μm ; в) electric field distribution of Schottky diode with thickness of 4H-SiC epitaxial layer equals 17 μm ; д) electric field distribution of Schottky diode with thickness of 4H-SiC epitaxial layer equals 18 μm

На рис. 2. а) представлены полученные результаты расчетов обратной вольт-амперной характеристики 4Н-SiC диодов Шоттки. Из рис. 2. а) следует, что увеличение толщины эпитаксиального слоя 4Н-SiC до 17 мкм привело к повышению напряжения пробоя диода до 2316 В, что на 83 В выше чем при толщине слоя 16 мкм. Дальнейшее увеличение толщины 4Н-SiC слоя до 18 мкм приводит к тому, что диод пробивается при подаче обратного напряжения 2392 В. Таким образом, установлено, что увеличение толщины 4Н-SiC эпитаксиального слоя с 16 до 18 мкм приводит к заметному повышению значения величины пробоя диода Шоттки на 159 В.

Далее, с целью установления вероятного места пробоя диода, были построены карты распределения напряженности электрического поля диода Шоттки, показанные на рис. 2б-д. Установлено, что во всех случаях наиболее вероятное место пробоя находится за пределами последнего охранного кольца на краю дополнительного защитного слоя JTE.

Таким образом, использование защитного слоя ЖТЕ действительно снижает вероятность пробоя диода в пространстве между охранными кольцами и смещает место пробоя за пределы слоя ЖТЕ, что и было показано ранее другими исследователями [Baliga, 2019; Chen, 2006; Shur et al., 2006; Pan et al., 2017; Yuan et al., 2019]. Из картины распределения напряженности электрического поля диода Шоттки при различных толщинах эпитаксиального слоя (16, 17 и 18 мкм) также удалось оценить максимальное значение напряженности электрического поля диода Шоттки E_{max} . Полученные данные по максимальному значению напряженности электрического поля диода Шоттки и напряжению пробоя при различных значениях толщины эпитаксиального слоя 4H-SiC обобщены в таблице 1. Так, при толщине слоя 16 мкм максимальное значение электрическое поле принимает на краю дополнительного защитного слоя ЖТЕ, и составляет $E_{max}=3,48$ МВ/см. рис. 2. б).

Таблица 1.

Максимальное значение напряженности электрического поля диода Шоттки и напряжение пробоя при различных значениях толщины эпитаксиального слоя 4H-SiC

Table 1.

The maximal value of Schottky diode electric field strength and breakdown voltage at various values of 4H-SiC epitaxial layer thickness

h (мкм), толщина эпитаксиального слоя 4H-SiC диода Шоттки	E_{max} (МВ/см), максимальное значение напряженности электрического поля диода Шоттки	$U_{пр.}$ (В), напряжение пробоя диода Шоттки
16	3.48	2233
17	3.51	2316
18	3.54	2392

Последующее увеличение толщины слоя 4H-SiC до 17 мкм приводит к повышению значения E_{max} до 3,51 МВ/см (см. рис. 2с). Наконец, при толщине эпитаксиального слоя 4H-SiC равной 18 мкм, максимальное значение напряженности электрического E_{max} поля диода Шоттки составляет уже 3,54 МВ/см (см. рис. 2д).

Таким образом, оптимизируя различные уровни легирования ($3,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3} - 4,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$) и толщины эпитаксиального слоя 4H-SiC (16 – 18 мкм), можно получить диоды Шоттки с высокими значениями пробивного напряжения (до 2392 В) и пригодные для монтажа в современные малогабаритные металлополимерные корпуса (SOT, QFN).

4. Заключение. Исследованы характеристики охранной системы карбидокремниевых 4H-SiC диодов Шоттки с использованием метода физического моделирования и установлены оптимальные конфигурации (уровни легирования и толщины эпитаксиального слоя 4H-SiC) структуры диода для получения высоких значений пробивного напряжения. Установлено, что снижение концентрации доноров в эпитаксиальном слое 4H-SiC с $4,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ до $3,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (толщина эпитаксиального слоя – 16 мкм) приводит к заметному увеличению напряжения пробоя диода с 2085 В до 2232 В.

Показано, что увеличение толщины 4H-SiC эпитаксиального слоя с 16 до 18 мкм (концентрация доноров в эпитаксиальном слое 4H-SiC – $3,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$) приводит к существенному повышению значения величины пробоя диода Шоттки на 159 В от 2233 до 2392 В. Увеличение толщины эпитаксиального слоя от 16 до 17 мкм приводит к повышению значения максимального значения напряженности электрического поля диода Шоттки с 3,48 до 3,54 МВ/см. При этом, из картины распределения электрического поля диода установлено, что наиболее вероятное место пробоя находится за пределами последнего охранного кольца на краю дополнительного защитного слоя ЖТЕ. Показано, что использование защитного слоя ЖТЕ смещает место пробоя за пределы слоя ЖТЕ и снижает вероятность пробоя диода в пространстве между охранными кольцами.

На основании выполненных расчетов, установлено, что оптимальной конфигурацией для высоковольтного 4H-SiC диода Шоттки является концентрация доноров в эпитаксиальном слое 4H-SiC $3,75 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при толщине эпитаксиального слоя 18 мкм и системой из шести охранных колец ($N_{p+}=3,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) с дополнительным защитным слоем ЖТЕ ($N_{JTE}=3,8 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$).

Таким образом, выполненные расчеты дают возможность изготовления отечественных 4H-SiC диодов Шоттки предназначенных для монтажа в современные малогабаритные металлополимерные корпуса (SOT, QFN).

Список литературы

1. Иванов П. А., Потапов А. С., Рыбалка С. Б., Малаханов А. А. 2017. МОП-транзисторы со встроенным n-каналом на основе 4H-SiC: пространственная локализация свободных электронов под затвором. Журнал радиоэлектроники. 6: 1-10.
2. Розанов Ю. К. 2018. Силовая электроника. Эволюция и применение. М., Знак, 140 с.
3. Рыбалка С., Демидов А., Малаханов А. 2018(a). Силовые диоды и транзисторы на основе карбида кремния. Бо-Бассен, LAP LAMBERT Academic Publishing, 128 с.
4. Рыбалка С. Б., Демидов А. А., Кульченков Е. А., Дракин А.Ю. 2018(b). Исследование dv/dt характеристик карбидокремниевых диодов Шоттки. Научные ведомости БелГУ. Серия: Математика. Физика. 50(4): 460-468.
5. Рыбалка С. Б., Краюшкина Е. Ю., Демидов А. А., Дракин А. Ю., Зотин В. Ф. 2017. Расчет влияния материала анода на вольт-амперные характеристики диода Шоттки на основе карбида кремния 4H-SiC. Научные ведомости БелГУ. Серия: Математика. Физика. 48(20): 93-97.
6. Bakowski M., Gustafsson U. 1997. Lindefelt U Simulation of SiC High Power Devices Phys. Stat. Sol. (a). 162: 421-440.
7. Baliga B.J. 2019. Wide Bandgap Semiconductor Power Devices: Materials, Physics, Design, and Applications. Cambridge, Woodhead Publishing-Elsevier, 409 p.
8. Chang-Chien P. et al. 2006. Low Temperature, Hermetic, High-yield Wafer-Level Packaging Technology. Northrop Grumman Technology Review Journal. 14(1): 57-78.
9. Chen L., Guy O. J., Doneddu D., Batcup S. G. J., Wilks S. P., Mawby P. A., Bouchet, Torregrosa F. Report on 4H-SiC JTE Schottky diodes. 2006. Microelectronics Reliability. 46(2-4): 637-640.
10. C3D1P7060Q Silicon Carbide Schottky Diode, Rev. F, 10-2015, Cree, Inc (<https://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/846/product/99/c3d1p7060q.pdf>)
11. Ingram B. 2008. Wafer Cap-packaged Amplifiers Drive Innovation into RF Designs. Microwave Journal. 51(12): 114-118.
12. Kang Y. H. 2014. Semiconductor Technologies in the Era of Electronics. Dordrecht, Springer, 149 p.
13. Kimoto T., Cooper J. A. 2014. Growth, Characterization, Devices, and Applications. Fundamentals of Silicon Carbide Technology. New York, Wiley-IEEE Press, 539 p.
14. Kimoto T., Yonezawa Y. 2018. Current status and perspectives of ultrahigh-voltage SiC power devices. Materials Science in Semiconductor Processing. 78: 43-56.
15. Lu D., Wong C. P. 2017. Materials for advanced packaging. Cham, Springer International Publishing, 974 p.
16. Pan Y., Tian L., Wu H., Li Y., Yang F. 2017. 3.3 kV 4H-SiC JBS diodes with single-zone JTE termination. Microelectronic Engineering. 181: 10-15.
17. 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". 10224: 102240Y-1-102240Y-5.
18. Panchenko P. V., Rybalka S. B., Malakhanov A. A., Demidov A. A., Krayushkina E. Yu., Shishkina O. A. 2017. Silicon carbide of Ni/6H-SiC and Ti/4H-SiC type Schottky diode current-voltage characteristics modelling. J. Phys.: Conf. Ser. 917: 082010(5 pp).
19. Sedykh S. V., Rybalka S. B., Drakin A. Yu., Demidov A. A. et al. 2018. Ti/4H-SiC Schottky diode breakdown voltage with different thickness of 4H-SiC epitaxial layer. J. Phys.: Conf. Ser. 1124: 071012(5 pp).
20. Sedykh S. V., Rybalka S. B., Drakin A. Yu., Demidov A. A., Kulchenkov E. A. 2019. Determination of dV/dt values for domestic SiC Schottky diodes. J. Phys.: Conf. Ser. 1410: 012195(5 pp).

21. Shur M., Rumyantsev S., Levishtein M. 2006. SiC Materials and Devices. Singapore, World Scientific Publishing Co. Inc, 335 p.
22. Silicon Carbide Semiconductor Products, Microsemi Corporation, 2018 (https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/132082-sic-products-brochure)
23. Yuan H., Tang X., Song Q., He Y., He X., Zhang Y., Zhang Y. 2019. The analysis and characteristics of 4H-SiC floating junction JBS diodes with different structures underneath the termination region. Solid-State Electronics. 160: 107620(4 pp).

References

1. Ivanov P. A., Potapov A. S., Rybalka S. B., Malakhanov A. A. 2017. 4H-SiC MOS transistors with accumulation-type n-channel: spatial distribution of free electrons under the gate. Journal of Radio Electronics. 6: 1-10. (in Russian)
2. Rozanov Yu. K. 2018. Silovaja jelektronika. Jevoljucija i primenenie. [Power Electronics. Evolution and Application]. Moscow, Publ. Znak, 140 p.
3. Rybalka S., Demidov A., Malakhanov A. 2018(a). Silovye diody i tranzistory na osnove karbida kremnija. [Power diodes and transistors on the base of silicon carbide]. Beau Bassin, LAP LAMBERT Academic Publishing, 128 p.
4. Rybalka S. B., Demidov A. A., Kulchenkov E. A., Drakin A. Yu. 2018(b). Study of the dV/dt characteristics of the silicon carbide Schottky diodes. Belgorod State University Scientific Bulletin: Mathematics & Physics. 50(4): 460-468. (in Russian)
5. Rybalka S. B., Krayushkina E. Yu., Demidov A. A., Drakin A. Yu., Zotin V. F. 2017. Calculation of anode material effect on current-voltage characteristics of the Schottky diode on the base of 4H-SiC silicon carbide Belgorod State University Scientific Bulletin: Mathematics & Physics. 48(20): 93-97. (in Russian)
6. Bakowski M., Gustafsson U. 1997. Lindefelt U Simulation of SiC High Power Devices Phys. Stat. Sol. (a). 162: 421-440.
7. Baliga B. J. 2019. Wide Bandgap Semiconductor Power Devices: Materials, Physics, Design, and Applications. Cambridge, Woodhead Publishing-Elsevier, 409 p.
8. Chang-Chien P. et al. 2006. Low Temperature, Hermetic, High-yield Wafer-Level Packaging Technology. Northrop Grumman Technology Review Journal. 14(1): 57-78.
9. Chen L., Guy O. J., Doneddu D., Batcup S.G.J., Wilks S.P., Mawby P.A., Bouchet, Torregrosa F. Report on 4H-SiC JTE Schottky diodes. 2006. Microelectronics Reliability. 46(2-4): 637-640.
10. C3D1P7060Q Silicon Carbide Schottky Diode, Rev. F, 10-2015, Cree, Inc (<https://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/846/product/99/c3d1p7060q.pdf>)
11. Ingram B. 2008. Wafer Cap-packaged Amplifiers Drive Innovation into RF Designs. Microwave Journal. 51(12): 114-118.
12. Kang Y.H. 2014. Semiconductor Technologies in the Era of Electronics. Dordrecht, Springer, 149 p.
13. Kimoto T., Cooper J. A. 2014. Growth, Characterization, Devices, and Applications. Fundamentals of Silicon Carbide Technology. New York, Wiley-IEEE Press, 539 p.
14. Kimoto T., Yonezawa Y. 2018. Current status and perspectives of ultrahigh-voltage SiC power devices. Materials Science in Semiconductor Processing. 78: 43-56.
15. Lu D., Wong C.P. 2017. Materials for advanced packaging. Cham, Springer International Publishing, 974 p.
16. Pan Y., Tian L., Wu H., Li Y., Yang F. 2017. 3.3 kV 4H-SiC JBS diodes with single-zone JTE termination. Microelectronic Engineering. 181: 10-15.
17. 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". 10224: 102240Y-1-102240Y-5.

18. Panchenko P. V., Rybalka S. B., Malakhanov A. A., Demidov A. A., Krayushkina E. Yu., Shishkina O. A. 2017. Silicon carbide of Ni/6H-SiC and Ti/4H-SiC type Schottky diode current-voltage characteristics modelling. J. Phys.: Conf. Ser. 917: 082010(5 pp).
19. Sedykh S. V., Rybalka S. B., Drakin A. Yu., Demidov A. A. et al. 2018. Ti/4H-SiC Schottky diode breakdown voltage with different thickness of 4H-SiC epitaxial layer. J. Phys.: Conf. Ser. 1124: 071012(5 pp).
20. Sedykh S. V., Rybalka S. B., Drakin A. Yu., Demidov A. A., Kulchenkov E. A. 2019. Determination of dV/dt values for domestic SiC Schottky diodes. J. Phys.: Conf. Ser. 1410: 012195(5 pp).
21. Shur M., Rumyantsev S., Levishtein M. 2006. SiC Materials and Devices. Singapore, World Scientific Publishing Co. Inc, 335 p.
22. Silicon Carbide Semiconductor Products, Microsemi Corporation, 2018 (https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/132082-sic-products-brochure)
23. Yuan H., Tang X., Song Q., He Y., He X., Zhang Y., Zhang Y. 2019. The analysis and characteristics of 4H-SiC floating junction JBS diodes with different structures underneath the termination region. Solid-State Electronics. 160: 107620(4 pp).

Получена 12.03.2020

Кульченков Евгений Александрович – старший преподаватель кафедры общей физики Брянского государственного технического университета

бул. 50 лет Октября, 7, Брянск, Россия,

E-mail: ewgeniy2000@mail.ru

Рыбалка Сергей Борисович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики Брянского государственного технического университета

бул. 50 лет Октября, 7, Брянск, Россия,

E-mail: sbrybalka@yandex.ru

Демидов Андрей Александрович – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей физики Брянского государственного технического университета

бул. 50 лет Октября, 7, Брянск, Россия,

E-mail: demandr@yandex.ru

Дракин Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной электроники и электротехники Брянского государственного технического университета

бул. 50 лет Октября, 7, Брянск, Россия,

E-mail: ada108@yandex.ru