

## Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 537.9; 621.382

doi:10.30987/2658-6436-2022-2-92-100

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОГО ДИОДА ШОТТКИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Алексей Алексеевич Малаханов<sup>1✉</sup>, Дмитрий Михайлович Медведев

<sup>1,2</sup> Брянский государственный технический университет; г. Брянск, Россия

<sup>1</sup> malakhan@yandex.ru,

<sup>2</sup> dm17rj@yandex.ru

**Аннотация.** Представлены результаты приборно-технологического моделирования статических вольтамперных характеристик (ВАХ), а также зависимостей дифференциального сопротивления и рассеиваемой мощности для структуры карбидокремниевого диода Шоттки в САПР Synopsys Sentaurus TCAD. В результате исследований и моделирования подобраны конструктивно-технологические параметры диода Шоттки, на основе которых получены ВАХ, сопоставимые с заданной точностью с физическим экспериментом (ток анода не менее 100 А, пробивное напряжение не менее 1400 В при температуре 77 К). Выполнена верификация полученных приборно-технологическим моделированием статических характеристик диода Шоттки путем сопоставления результатов вычислительного эксперимента с физическим исследованием диода C4D20120D фирмы Cree для диапазона температур от 300 К до 77 К. Новизна работы заключается: в разработке приборно-технологической модели (ПТМ) полупроводникового прибора, учитывающей эффект саморазогрева кристалла; получении результатов, отражающих характеристики полупроводникового прибора в нормальных и экстремальных температурных режимах эксплуатации; получении зависимостей, отражающих изменение дифференциального сопротивления и рассеиваемую мощность; возможности использования результатов разработанной ПТМ для промышленной реализации карбидокремниевого диода Шоттки на предприятиях России в виде дискретных полупроводниковых приборов, либо элементов в составе полупроводниковых силовых модулей.

**Ключевые слова:** диод Шоттки, жидкий азот, приборно-технологическая модель, TCAD, статические характеристики, конструктивно-технологическое решение, карбид кремния

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке Фонда перспективных исследований, договор №6/211/2021ав от 25.02.2021.

**Для цитирования:** Малаханов А.А., Медведев Д.М. Моделирование характеристик силового диода Шоттки в экстремальных режимах эксплуатации / Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №2 (16). С. 92-100. doi: 10.30987/2658-6436-2022-2-92-100.

Original article

Open Access Article

### MODELING POWER CHARACTERISTICS OF SCHOTTKY DIODE UNDER EXTREME OPERATION MODES

Aleksey A. Malakhanov<sup>1✉</sup>, Dmitry M. Medvedev<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Bryansk State Technical University; Bryansk, Russia

<sup>1</sup> malakhan@yandex.ru,

<sup>2</sup> dm17rj@yandex.ru

**Abstract.** The results of device-technological modelling of static current-voltage characteristics (CVC), as well as the dependences of differential resistance and power dissipation for the structure of a silicon carbide Schottky diode in Synopsys Sentaurus TCAD are presented. As a result of the research and modelling, the design and technological parameters of the Schottky diode are selected, on the basis of which the current-voltage characteristics are obtained.

comparable with the specified accuracy with the physical experiment (the anode current is not less than 100 A, the breakdown voltage is not less than 1400 V at a temperature of 77 K). Verifying the static characteristics of the Schottky diode obtained by the instrumental-technological modelling is carried out by comparing the results of a computational experiment with a physical study of the Cree C4D20120D diode for a temperature range from 300 K to 77 K. The novelty of the work lies in developing an instrument-technological model (ITM) of a semiconductor device that takes into consideration a crystal self-heating effect; obtaining results reflecting the characteristics of a semiconductor device in the normal and extreme temperature operating conditions; in obtaining dependences reflecting the change in differential resistance and power dissipation; in having the possibility to use the results of the developed ITM for the industrial implementation of the silicon carbide Schottky diode at Russian enterprises in the form of discrete semiconductor devices, or elements as part of semiconductor power modules.

**Keywords:** Schottky diode, liquid nitrogen, instrument-technological model, TCAD, static characteristics, constructive-technological solution, silicon carbide

**For citation:** Malakhanov A.A., Medvedev D.V. Modeling power characteristics of Schottky diode under extreme operation modes. Automation and modeling in design and management, 2022, no. 2 (16). pp. 92-100. doi: 10.30987/2658-6436-2022-2-92-100.

## Введение

Диоды Шоттки (ДШ) находят свое применение в различных устройствах электроники и преобразовательной техники: импульсных преобразователях электроэнергии; выпрямителях; модуляторах; детекторах; в качестве обратных диодов мощных полупроводниковых ключей и др. направлениях. Диоды Шоттки используются в электронной технике как неуправляемые полупроводниковые ключи. В отличие от обычных полупроводниковых диодов с р-п-переходом выпрямляющий эффект в ДШ обеспечивается взаимодействием металла и полупроводника [1, 2]

Диоды Шоттки могут быть изготовлены на основе различных полупроводниковых материалов: кремний (Si); арсенид галлия (GaAs); карбид кремния (SiC) и др. При использовании тех или иных полупроводниковых материалов могут быть достигнуты разные значения статических характеристик ДШ и обеспечены требуемые режимы эксплуатации. Металл для контакта Шоттки, а также его надежный контакт с полупроводником влияют на электрофизические параметры диода [1]. Необходимая величина контактной разницы потенциалов достигается применением различных металлов и их комбинаций – это серебро (Ag); золото (Au); платина (Pt); палладий (Pd); вольфрам (W) и др. материалы, которые при помощи определенных технологических операций наносятся на полупроводник или на вспомогательные подслои, обеспечивая при этом требуемый потенциальный барьер в эВ [1].

В настоящее время существует большое количество фирм и предприятий, производящих ДШ. Например: арсенид галлиевые ДШ на высокие обратные напряжения выпускает фирма IXYS (США); карбидокремниевые ДШ различного номинала токов и напряжений – Cree (США), Infineon Technologies (ФРГ), АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» (Россия) и ряд других.

Несмотря на то, что ДШ можно условно отнести к достаточно простым полупроводниковым приборам, существует большое количество его конструктивно-технологических вариантов и исполнений [2 – 5] каждый из которых имеет свои плюсы и минусы, значения электрофизических параметров и характеристик, а также направления в применении.

Одним из перспективных направлений применения полупроводниковых ключей (диодов; диодов Шоттки; транзисторов) в ближайшем будущем могут стать преобразователи электроэнергии для систем электродвижения, работающих на принципах высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП-электродвижения) [6 – 9]. И естественным образом остро встанет вопрос разработки и создания электронной компонентной базы способной работать в условиях и температурных режимах, при которых эффект ВТСП проявляется наиболее эффективно. В настоящее время и за рубежом, и в нашей стране появляются исследования работы полупроводниковых приборов и преобразователей электроэнергии в условиях экстремального охлаждения вплоть до температуры жидкого азота 77 К (-196 °С) и ниже [7, 9 – 12]. Снижение рабочей температуры преобразователей и обеспечение устойчивости их работы будет способствовать:

– уменьшению статических и динамических потерь в преобразователях электроэнергии (инверторах напряжения и тока; электрических выпрямителях; преобразователях частоты и т.д.) [13];

– исключению необходимости использования крупногабаритных охладителей для мощных полупроводниковых приборов, тем самым будут уменьшены массогабаритные

показатели готового устройства:

– повышению в преобразователях электроэнергии удельного показателя по мощности от текущего значения на уровне 1 кВт/кг для стандартного диапазона температур до 10...15 кВт/кг и выше для диапазон температур, расширенный до криогенной области [6, 9, 14];

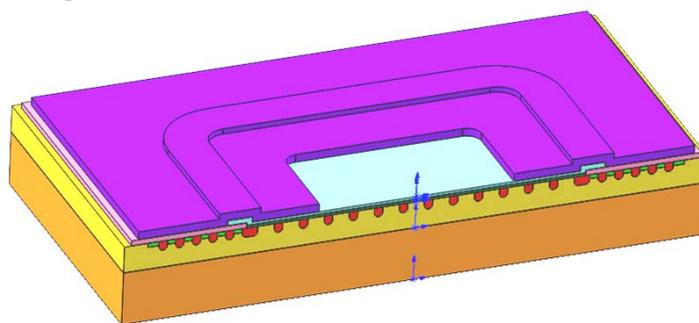
– повышению коэффициента полезного действия преобразователей электроэнергии;

– повышению качества преобразованной электроэнергии за счёт увеличения частот коммутации и др.

### Материалы, модели, эксперименты и методы

В статье представлена верифицированная приборно-технологическая модель ДШ, получены результаты моделирования ее параметров и характеристик в расширенном температурном диапазоне (от 300 К до 77 К), приведены результаты сопоставления результатов моделирования с экспериментальными исследованиями диода Шоттки C4D20120D фирмы Cree.

Рассмотрим создание приборно-технологических моделей ДШ, эскиз кристалла которого представлен на рис. 1.



**Рис. 1. Эскиз структуры кристалла диода с барьером Шоттки в разрезе**  
*Fig. 1. A sketch of the crystal structure of a Schottky barrier diode (SBD) in the section*

Из рисунка видно, что структура ДШ кроме контакта Шоттки имеет в своем составе систему охранных колец [4, 15], расположенную по периферии контакта Шоттки, а также JBS структуру [3, 16], чередующуюся с контактом Шоттки в центральной части полупроводникового кристалла.

Параметры областей структуры, такие как количество охранных колец и их геометрия, толщина слоев полупроводников и металла для контакта Шоттки были определены на основе изучения образца кристаллов полупроводникового прибора (рис. 2).

Расчет статических характеристик и параметров ДШ был осуществлен в САПР Synopsys Sentaurus TCAD [17].

Разработанные приборно-технологические модели предназначены для расчета прямых и обратных ВАХ карбидокремниевое ДШ при окружающей температуре в диапазоне от  $-196^{\circ}\text{C}$  до  $+25^{\circ}\text{C}$  (от 77 К до 300 К). В приборно-технологической модели на основании изучения образца и сопоставления с результатами физического эксперимента были заданы параметры материалов, сформированы необходимые конструктивно-технологические элементы (охранные кольца; профили распределения примеси) и учтены ряд требований к осуществлению расчетных процедур (эффект саморазогрева; выбор решателя и пр.).

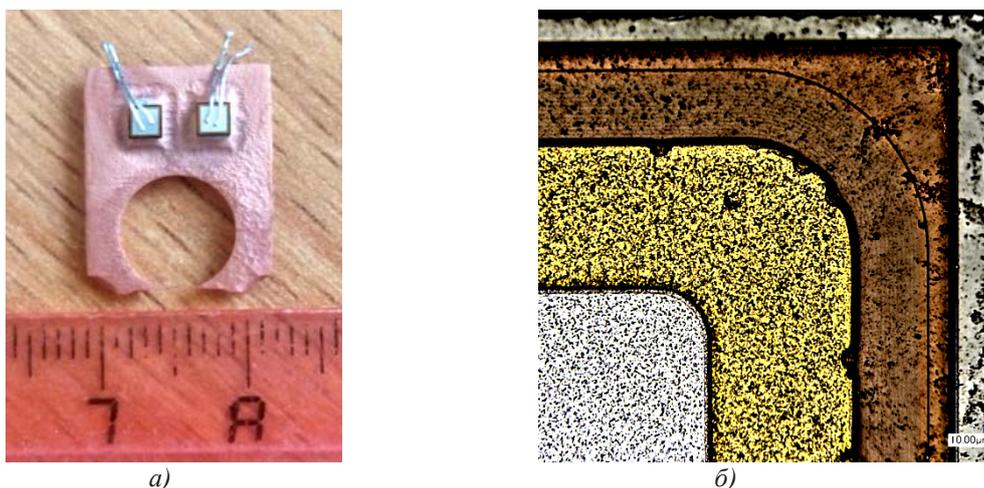
Структура ПТМ диода Шоттки C4D20120D на основе карбида кремния состоит из двух проектов SWB. Первый проект рассчитывает прямые ВАХ, второй проект – обратные ВАХ.

Каждый из проектов состоит из трех модулей:

- 1) SDE – формирует структурно-геометрическую модель для расчетов ВАХ;
- 2) SDEVICE – рассчитывает ВАХ;
- 3) SVISUAL – визуализирует результаты расчетов и экспортирует их в файл CSV.

В текстах командных файлов каждого из используемых модулей приводятся сведения о геометрии полупроводниковой структуры, параметрах расчетной сетки, методах численного расчета, режимов и др.

Основные параметры проектов задаются в интерактивном режиме, для расчета прямых ВАХ они представлены в табл. 1 и табл. 2, для расчета обратных ВАХ – в табл. 3 и табл. 4.



а)

б)

**Рис. 2. Исследуемый образец диода Шоттки:**

а – вид двух кристаллов ДШ со снятой крышкой корпуса; б – вид кристалла под микроскопом

**Fig. 2. The studied sample of the SBD:**

а – a view of two SBD crystals with the case cover removed; б – a view of the crystal under a microscope

Таблица 1

**Параметры модели ДШ, задаваемые в SDE, для расчета прямых ВАХ**

Table 1

*Parameters of the SBD model set in SDE for calculating forward current-voltage characteristics*

Обозначение	Наименование	Значение
Csub	Концентрация примеси в подложке	$1,55 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
Hepi	Толщина эпитаксиального слоя	24 мкм
Cepi	Концентрация примеси в эпитаксиальном слое	$6,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

Таблица 2

**Параметры модели ДШ, задаваемые в SDEVICE, для расчета прямых ВАХ**

Table 2

*Parameters of the SBD model set in SDEVICE for calculating forward current-voltage characteristics*

Обозначение	Наименование	Значение
F <sub>1a</sub>	Работа выхода из металла анода	4,5 эВ
TR	Поверхностное термическое сопротивление контактов	0,008 см <sup>2</sup> ·К/Вт
V <sub>amax</sub>	Максимальное напряжение на аноде	8 В
T	Температура	300, 223, 173, 123, 77 К

Таблица 3

**Параметры модели ДШ, задаваемые в SDE, для расчета обратных ВАХ**

Table 3

*Parameters of the SBD model set in SDE for calculating reverse current-voltage characteristics*

Обозначение	Наименование	Значение
Csub	Концентрация примеси в подложке	$1,55 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
Hepi	Толщина эпитаксиального слоя	24 мкм
Cepi	Концентрация примеси в эпитаксиальном слое	$6,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$
Hox	Толщина оксида	0,1 мкм
Wgra	Ширина охранного кольца возле анода	1,5 мкм
Wgr	Ширина остальных охранных колец	1,5 мкм
Sgr	Расстояние между охранными кольцами	3 мкм
Hgr	Глубина залегания переходов в областях охранных колец	1,7 мкм
Cgr	Концентрация примеси в областях охранных колец	$10^{18} \text{ см}^{-3}$
Lj <sub>te</sub>	Длина области структуры JTE	10 мкм
Hj <sub>te</sub>	Глубина залегания переходов в области структуры JTE	1,5 мкм
Cj <sub>te</sub>	Концентрация примеси в области структуры JTE	$10^{17} \text{ см}^{-3}$

**Параметры модели ДШ, задаваемые в SDEVICE, для расчета обратных ВАХ**

*Parameters of the SBD model set in SDEVICE for calculating reverse current-voltage characteristics*

Обозначение	Наименование	Значение
Icmin	Минимальный ток катода	$5 \cdot 10^{-7}$ А
CCG	Параметр опции Recombination (ConstantCarrierGeneration)	$10^5$
Vсmax	Максимальное напряжение на катоде	2000 В
T	Температура	300, 223, 173, 123, 77 К

Стоит отметить, что в модели для расчета прямых ВАХ в геометрии диода Шоттки не рассматривались охранные кольца и структура JBS, т.к. они не влияют на работу прибора в прямом направлении. В модели же для расчета обратных ВАХ система охранных колец присутствует.

При расчете прямых ВАХ моделируется часть прибора под анодом, затем результаты расчетов приводятся в соответствие всему прибору с помощью масштабного фактора AreaFactor.

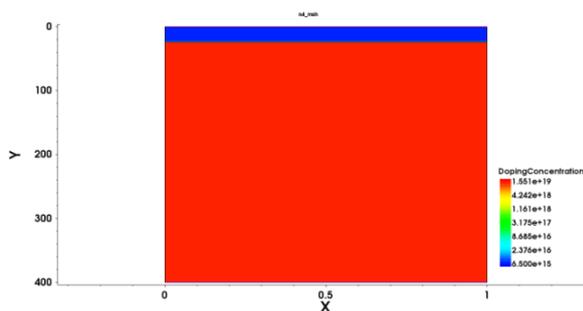
При расчете обратных ВАХ моделируется закругленная часть охранной области прибора в цилиндрической системе координат, затем результаты расчетов также приводятся в соответствие всему прибору с помощью масштабного фактора AreaFactor.

### Результаты

В результате выполнения командных файлов модуля SDE формируются структурно-геометрические модели ДШ (рис. 3, 4).

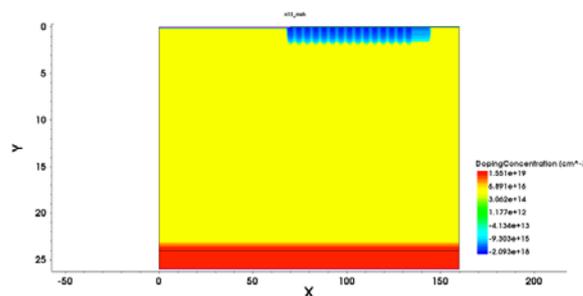
Результаты моделирования характеристик ДШ были сопоставлены с экспериментальными исследованиями для верификации приборно-технологической модели. На рис. 5, 6 представлены расчетные ВАХ и сопоставление их с экспериментальными. В табл. 5 приведены результаты верификации расчетных значений напряжений пробоя модели диода Шоттки и образца C4D20120D.

Из рис. 5 видно, что при снижении температуры окружающей среды наблюдается смещение прямой ВАХ в сторону увеличения прямого падения напряжения при низких значениях прямого тока, с увеличением прямого тока наблюдается рост крутизны ВАХ диода с последующим выходом кривой тока в зону насыщения. Снижение температуры окружающей среды и, соответственно, температуры кристалла способствует повышению тока анода, при котором наблюдается насыщение.



**Рис. 3. Структура модели ДШ для расчета прямых ВАХ**

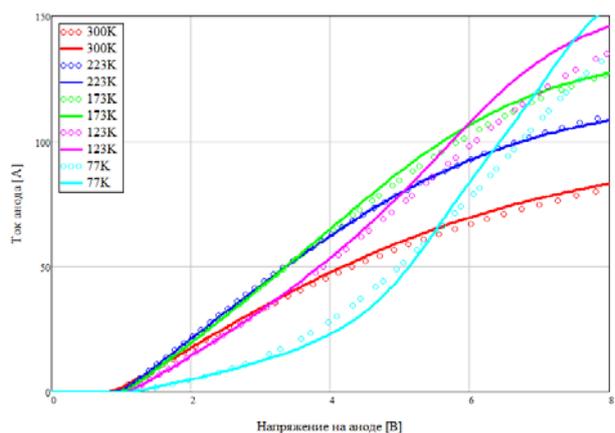
*Fig. 3. The structure of the SBD model for calculating direct current-voltage characteristics (CVCs)*



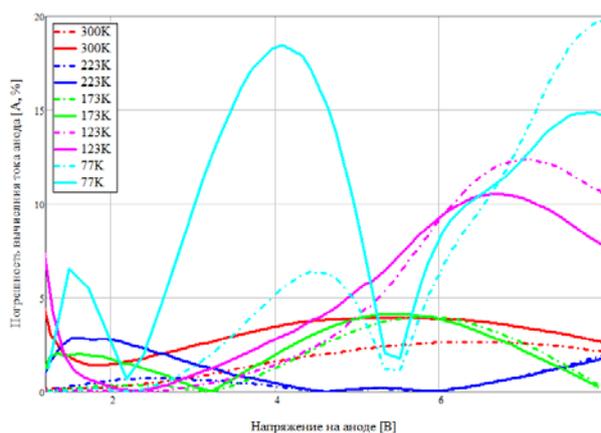
**Рис. 4. Структура модели ДШ для расчета обратных ВАХ**

*Fig. 4. The structure of the SBD model for calculating the revers CVCs*

На рис. 6 в одних осях построены кривые, отражающие абсолютные и относительные погрешности расчетов в сравнении с экспериментами при разных температурах. Максимальные значения погрешностей наблюдаются при температурах 123 К и 77 К.



**Рис. 5. Прямые ВАХ диода Шоттки C4D20120D**  
(точки – измеренные значения, линии – вычисленные значения)  
**Fig. 5. Direct current-voltage characteristics of the Schottky barrier diode C4D20120D**  
(dots are measured values; lines are calculated values)



**Рис. 6. Результаты верификации прямых ВАХ модели диода Шоттки C4D20120D**  
(штрихпунктирные линии – абсолютная погрешность, сплошные – относительная погрешность)  
**Fig. 6. Verification results of direct CVCs of the Schottky diode model C4D20120D**  
(dashed and dotted lines – absolute error, solid lines – relative error)

Таблица 5

**Результаты верификации расчетных значений напряжений пробоя модели диода Шоттки и образца C4D20120D**

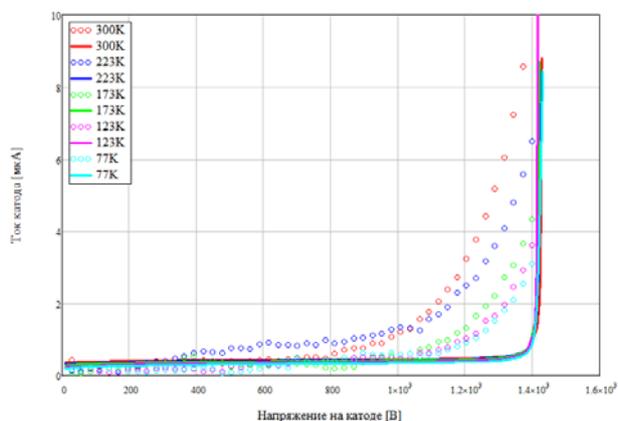
Table 5

**Results of verification of calculated values of breakdown voltages of the SBD model and sample C4D20120D**

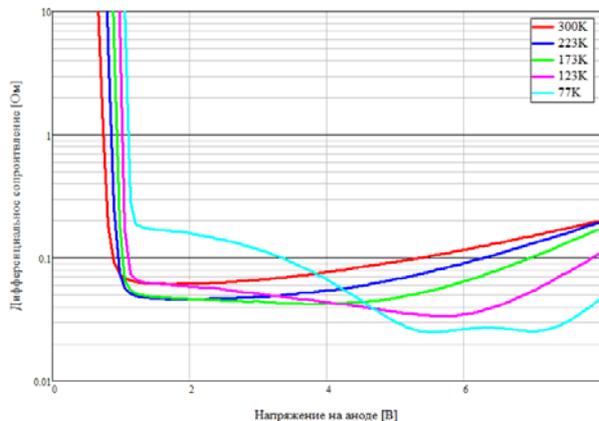
Температура, К	Напряжение пробоя, В		Абсолютная погрешность, В	Относительная погрешность, %
	Измеренное	Вычисленное		
300	1400	1427	27	1,93
223	1400	1422	22	1,57
173	1400	1420	20	1,43
123	1400	1418	18	1,29
77	1400	1431	31	2,21

На обратных ВАХ (рис. 7) при уменьшении температуры наблюдается снижение уровня обратного тока, пробивное же напряжение остается практически неизменным.

На рис. 8 представлена зависимость дифференциального сопротивления от напряжения на аноде. Как можно заметить зависимости являются нелинейными и имеют экстремумы с минимальными значениями дифференциального сопротивления. Экстремумы смещаются в сторону увеличения прямого падения напряжения на ДШ с понижением температуры.

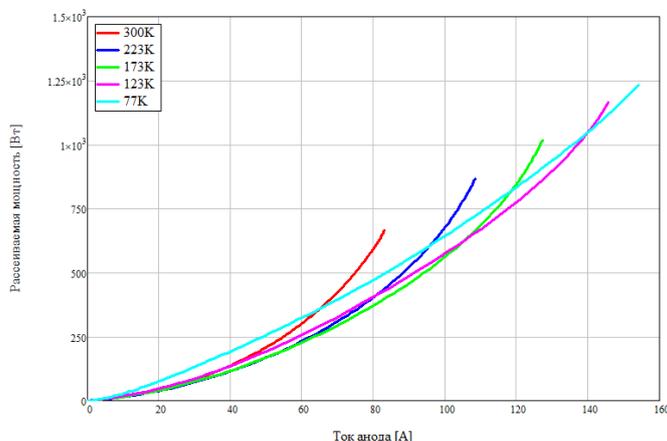


**Рис. 7. Обратные ВАХ ДШ (точки – измеренные значения, линии – вычисленные значения)**  
**Fig. 7. Reverse CVCs SBD (dots - measured values, lines - calculated values)**



**Рис. 8. Зависимость дифференциального сопротивления от напряжения на аноде ДШ**  
**Fig. 8. Dependence of the differential resistance on the voltage at the anode of the SBD**

На рис. 9 приведены зависимости рассеиваемой мощности ДШ от тока анода. Как можно заметить зависимости имеют нелинейный характер, с ростом тока анода и понижения температуры наблюдаются сначала процессы выравнивания потерь при разных температурах (точки пересечения характеристик), при дальнейшем росте тока анода видно, что при уменьшении температуры потери ниже. В общей картине работы наблюдается возможность диода Шоттки к нормальному функционированию с кратным увеличением прямых токов и потерь в случае снижения рабочих температур до экстремальных значений.



**Рис. 9. Зависимость рассеиваемой мощности от тока анода ДШ**  
**Fig. 9. The dependence of power dissipation on the current of the anode of the SBD**

### Заключение

В работе получен результат исследования прямых и обратных ВАХ ПТМ диода Шоттки в САПР Synopsys Sentaurus TCAD при пяти значениях температуры окружающей среды 27 °С (300 К); - 50 °С (223 К); - 100 °С (173 К); - 150 °С (123 К); -196 °С (77 К), а также проведена верификация модели на основе сопоставления результатов моделирования и эксперимента.

В результате выполненных исследований ДШ для диапазона температур от 300 К до 77 К:

- получены прямые ВАХ, средняя абсолютная погрешность расчета которых не превышает 3 % для температуры 300 К и ниже 10 % для температуры 77 К в рабочем диапазоне значений прямых токов и напряжений, приведенном в техническом описании на ДШ С4D20120D;

- выявлено более чем двукратное повышение уровня прямых токов диода Шоттки в режиме насыщения с понижением температуры от 300 К до 77 К;

- получены обратные ВАХ и определены пробивные напряжения ДШ, погрешность расчета пробивных напряжений менее 3 %, выявлено практически неизменное значение пробивного напряжения с понижением температуры;

- рассчитано значение дифференциального сопротивления, выявлено многократное снижение дифференциального сопротивления диода Шоттки с понижением температуры от 300 К до 77 К и с ростом прямого падения напряжения;

- определены значения потерь в структуре диода при изменении температуры окружающей среды, выявлено наличие точек с одинаковыми потерями при разных температурах;

- предложено конструктивно-технологическое решение с набором физико-технических параметров диода Шоттки, обеспечивающее требуемое значение прямого тока и пробивного напряжения на уровне не ниже 100 А а и 1400 В соответственно при экстремальных режимах эксплуатации

### Список источников:

1. Рыбалка С.Б., Демидов А.А., Малаханов А.А. Силовые диоды и транзисторы на основе карбида кремния: монография. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 129 с.
2. Baliga, B.J. Fundamentals of Power Semiconductor

### References:

1. Rybalka S.B., Demidov A.A., Malakhanov A.A. Power Diodes and Transistors on the Base of Silicon Carbide. Beau Bassin: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2018.
2. Baliga, B.J. Fundamentals of Power Semiconductor

- Devices. Cham: Springer International Publishing, 2019.
3. Экспериментальные диоды Шоттки-(p-n) (JBS-диоды) на основе 4H-SiC / П.А. Иванов [и др.] // Физика и техника полупроводников. Т. 43. № 9. С. 1249-1252.
  4. Luo, X. Design and fabrication of high voltage 4H-SiC Schottky barrier diodes. 2019.
  5. Исследование стойкости SiC-диодов Шоттки ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» к скорости нарастания обратного напряжения / Н.А. Брюхно [и др.] // Силовая Электроника. 2018. Т. 2. № 71.
  6. Проблемы криогенного охлаждения полупроводниковых вентилях статических преобразователей / Г.А. Дубенский [и др.] // Электричество. 2019. № 6. С. 4-12.
  7. A Cryogenically Cooled MW Inverter for Electrified Aircraft Propulsion / R. Chen [et al.] // AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum. VIRTUAL EVENT: American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2020.
  8. Improving Performance of Cryogenic Power Electronics / P. Haldar [et al.] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2005. Vol. 15. № 2. P. 2370-2375.
  9. Kshirsagar P. Superconducting Motor and Cryo-Cooled Inverter Engine: SOARING. P. 12.
  10. Superconducting motors for aircraft propulsion: the Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator project / F. Grilli et. al. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Т. 1590. – Superconducting motors for aircraft propulsion. С. 012051.
  11. Медведев Д.М. Малаханов А.А. Моделирование вольт-амперных характеристик LDD MOS транзистора при криогенной температуре // Сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции. – Брянский государственный технический университет. 2020. С. 390-393. DOI: 10.51932/9785907271739\_390.
  12. Boll D.M. 10 MW HTS Generator für hybrid-elektrische Flugzeugantriebe. 2020. P. 29.
  13. Моделирование электропривода переменного тока с алгоритмами пространственно-векторной модуляции / Н.В. Чуприна [и др.] // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. № 1 (15). С. 80-88.
  14. European Commission. Directorate General for Research and Innovation. Flightpath 2050: Europe's vision for aviation: maintaining global leadership and serving society's needs. Flightpath 2050 / European Commission. Directorate General for Research and Innovation., European Commission. Directorate General for Mobility and Transport. – LU: Publications Office. 2011.
  15. Высоковольтные (1800В) планарные p-n переходы на основе 4H-SiC с плавающими охранными кольцами / П.А. Иванов [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43. № 4. С. 527-530.
  16. Высоковольтные (3,3кВ) JBS-диоды на основе 4H-SiC / П.А. Иванов [и др.] // Физика и техника Devices. Cham: Springer International Publishing, 2019.
  3. Ivanov P.A. Experimental Junction Barrier Schottky (JBS) Diodes Based on 4H-SiC. Semiconductors. 2009;43(9):1249-1252.
  4. Luo, X. Design and fabrication of high voltage 4H-SiC Schottky barrier diodes. 2019.
  5. Belly N.A. Study of resistance of the ZAO «Gruppa Kremny EL» SiC Schottky Diode to the Speed of Increase of the Reverse Voltage. Power Electronics. 2018;2:71.
  6. Dubensky G.A. Matters Concerned with Using Cryogenic Cooling of Static Converter Semiconductor Switches. Elektrichestvo. 2019;6:4-12.
  7. A Cryogenically Cooled MW Inverter for Electrified Aircraft Propulsion / R. Chen [et al.] // AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum. VIRTUAL EVENT: American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2020.
  8. Improving Performance of Cryogenic Power Electronics / P. Haldar [et al.] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2005. Vol. 15. № 2. P. 2370-2375.
  9. Kshirsagar P. Superconducting Motor and Cryo-Cooled Inverter Engine: SOARING. P. 12.
  10. Superconducting motors for aircraft propulsion: the Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator project / F. Grilli et. al. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Т. 1590. – Superconducting motors for aircraft propulsion. P. 012051.
  11. Medvedev DM Malakhanov AA. Modelling of the Current-Voltage Characteristics of LDD MOS Transistor at Cryogenic Temperature. In: Proceedings of the IVth International Scientific and Practical Conference; 2020; Bryansk: Bryansk State Technical University: 2020. p. 390-393. doi: 10.51932/9785907271739\_390.
  12. Boll D.M. 10 MW HTS Generator für hybrid-elektrische Flugzeugantriebe. 2020. P. 29.
  13. Chuprina N.V. Modelling of an AC Electric Drive with Space-Vector Modulation Algorithms. Automation and Modelling in Design and Management. 2022;1(15):80-88.
  14. European Commission. Directorate General for Research and Innovation. Flightpath 2050: Europe's vision for aviation: maintaining global leadership and serving society's needs. Flightpath 2050 / European Commission. Directorate General for Research and Innovation., European Commission. Directorate General for Mobility and Transport. – LU: Publications Office. 2011.
  15. Ivanov P.A. High-Voltage (1800V) Planar 4H-SiC p-n Junctions with Floating Guard Rings. Semiconductors. 2009;43(4):527-530.
  16. Ivanov P.A. High-Voltage (3.3 kV) 4H-SiC JBS Diodes. Semiconductors. 2011;45(5):677-681.

полупроводников. 2011. Т. 45. № 5. С. 677-681.

17. TCAD - Technology Computer Aided Design (TCAD) | Synopsys [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.synopsys.com/silicon/tcad.html> (дата обращения: 04.04.2022)

17. TCAD - Technology Computer Aided Design (TCAD) | Synopsys [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.synopsys.com/silicon/tcad.html> (accessed: 04.04.2022).

#### Информация об авторах

**Малаханов Алексей Алексеевич**

заведующий кафедрой, доцент, к.т.н. Брянского государственного технического университета

**Медведев Дмитрий Михайлович**

доцент, к.т.н. Брянского государственного технического университета

#### Information about authors:

**Malakhanov Aleksey Alekseevich**

Head of the Department, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences of Bryansk State Technical University

**Medvedev Dmitry Mikhailovich**

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences of Bryansk State Technical University

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 13.04.2022; одобрена после рецензирования 28.04.2022; принята к публикации 29.04.2022.**

**The article was submitted 13.04.2022; approved after reviewing 28.04.2022; accepted for publication 29.04.2022.**

**Рецензент** – Михальченко С.Г., доктор технических наук, доцент, Томский университет систем управления и радиоэлектроники.

**Reviewer** – Mihal'chenko S.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

---

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: (4832) 56-49-90. E-mail: aim-ru@mail.ru

*Вёрстка А.А. Алисов. Редактор Д.А. Петраченкова.*

Сдано в набор 15.06.2022. Выход в свет 30.06.2022.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 11,63.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Брянский государственный технический университет»

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

---

12+