

Электрическая характеристика силовых карбидокремниевых MOSFET с линейным и гексагональным дизайном базовых ячеек

А. В. Афанасьев[✉], П. В. Афанасьев, В. А. Ильин, А. В. Серков,
В. В. Трушлякова, Д. А. Чигирев, С. А. Шевченко, А. Восколович, С. А. Пологов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] avafanasev@etu.ru

Аннотация

Введение. Силовая электроника на основе 4H-SiC активно развивается за счет достигнутого промышленными странами высокого уровня промышленной технологии роста объемных кристаллов и эпитаксиальных структур карбида кремния и требует разработки новых конструкций МОП-транзисторов (MOSFET) и диодов Шоттки, совершенствования технологических процессов. Подобные исследования актуальны, востребованы и являются основой для широкого внедрения SiC-приборов в различные области силовой электроники и преобразовательной техники для достижения целевых показателей энергоэффективности.

Цель работы. Исследование и сопоставительный анализ характеристик энергоэффективности лабораторных образцов силовых 4H-SiC-MOSFET с дизайном базовых ячеек линейного и гексагонального типов.

Материалы и методы. На начальном этапе объектами исследования были лабораторные образцы 4H-SiC-MOSFET малой площади с двумя типами ячеек, рассчитанные на напряжение до 1200 В. Затем были изготовлены и исследованы лабораторные образцы 4H-SiC-MOSFET с оптимизированными параметрами ячейки линейного типа с большей активной площадью. Транзисторы изготавливались в рамках лабораторного технологического маршрута без использования технологии формирования самосовмещенного канала. Характеристика образцов проводилась методами оптической и растровой электронной микроскопии, электрические параметры и характеристики измерялись на характеристикографе Keysight B1505A.

Результаты. Сопоставительный анализ ВАХ показывает, что транзисторы с гексагональной топологией ячеек в отличие от структур с линейной топологией характеризуются более высокими значениями коммутлируемых токов. При этом максимальная плотность тока $J_{DS} = 125 \text{ A/cm}^2$ не является критической для карбида кремния. Транзисторы с линейной топологией с уменьшенными размерами канала и увеличенной активной областью характеризуются более высокой плотностью тока и меньшим сопротивлением канала в открытом состоянии (R_{on}).

Заключение. Образцы транзисторов с гексагональной топологией ячеек при равных значениях R_{on} характеризуются более высокими по отношению к транзисторам с линейной топологией значениями коммутлируемых токов, но худшей воспроизводимостью параметров. Лабораторные образцы с оптимизированной линейной топологией ячеек характеризуются в ~4 раза меньшим R_{on} в сравнении с образцами с малой площадью активной области. Тем не менее выход годных транзисторов составляет менее 10 % по пороговому напряжению (U_{th}), что требует применения в маршруте их изготовления технологий самосовмещенного канала и литографии высокого разрешения при переходе к серийному производству.

Ключевые слова: силовые полевые транзисторы (MOSFET), карбид кремния, топология ячеек, электрическая характеристика

Для цитирования: Электрическая характеристика силовых карбидокремниевых MOSFET с линейным и гексагональным дизайном базовых ячеек / А. В. Афанасьев, П. В. Афанасьев, В. А. Ильин, А. В. Серков, В. В. Трушлякова, Д. А. Чигирев, С. А. Шевченко, А. Восколович, С. А. Пологов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 5. С. 54–65.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-5-54-65

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.06.2025; принята к публикации после рецензирования 15.07.2025; опубликована онлайн 28.11.2025

Electrical Characterization of Power Silicon Carbide MOSFETs with Linear and Hexagonal Base Cell Designs

Aleksei V. Afanasyev[✉], Petr V. Afanasyev, Vladimir A. Ilyin, Anton V. Serkov, Valentina V. Trushlyakova, Dmitry A. Chigirev, Sergey A. Shevchenko, Alexey Voskolovich, Semen A. Pologov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ avafanasev@etu.ru

Abstract

Introduction. The current advancement of 4H-SiC-based power electronics is driven by rapid progress in bulk and epitaxial growth technology of silicon carbide (SiC) crystals. This determines the demand for improved designs and manufacturing technologies of MOS transistors (MOSFET) and Schottky diodes. Research in this field is highly relevant for a widespread implementation of SiC devices in various areas of power electronics and conversion technology for achieving the required levels of energy efficiency.

Aim. Research and comparative analysis of electrical characteristics of 4H-SiC power MOSFET laboratory samples with linear and hexagonal base cell designs.

Materials and methods. The initial objects of the study were laboratory samples of 4H-SiC-MOSFET with two types of cells and a small-size active area, designed for voltages up to 1200 V. At a later stage, 4H-SiC-MOSFET laboratory samples with optimized parameters of a linear-type cell and a larger active area were manufactured and investigated. The transistors were manufactured via a laboratory technological route without applying a self-aligned channel technology. The samples were characterized using optical and scanning electron microscopy (SEM). Electrical parameters were measured by a Keysight B1505A curve tracer.

Results. The comparative analysis of the output characteristics of the samples showed that transistors with a hexagonal cell topology outperform those with a linear topology in terms of higher values of switching currents. However, the maximum current density $J_{DS} = 125 \text{ A/cm}^2$ is not critical for silicon carbide. Improved transistors with a linear topology with reduced channel dimensions and an increased active area are characterized by a higher current density and a lower channel resistance in the open state (R_{on}).

Conclusion. Transistor samples with a hexagonal cell topology in comparison with those with a linear topology, under equal R_{on} , demonstrate higher values of switched currents but lower reproducibility of parameters. Laboratory samples with an improved linear cell topology are characterized by ~ 4 times lower R_{on} compared to those with a small active area. Nevertheless, the achieved transistor yield in terms of threshold voltage U_{th} was less than 10 %, which indicates the necessity of implementation of self-aligned channel technologies and high-resolution lithography in their manufacturing route when scaling up their production.

Keywords: power field-effect transistors (MOSFET), silicon carbide, cell topology, electrical characterization

For citation: Afanasyev A.V., Afanasyev P. V., Ilyin V. A., Serkov A.V., Trushlyakova V. V., Chigirev D. A., Shevchenko S. A., Voskolovich A., Pologov S. A. Electrical Characterization of Power Silicon Carbide MOSFETs with Linear and Hexagonal Base Cell Designs. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 5, pp. 54–65.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-5-54–65

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 11.06.2025; accepted 15.07.2025; published online 28.11.2025

Введение. Наиболее распространёнными приборами современной силовой электроники на основе SiC являются униполярные приборы: диоды с барьером Шоттки и МОП-транзисторы (MOSFET) планарного (DMOSFET) типа и в

настоящее время менее распространённого траншейного типа (Trench MOSFET) [1]. Из-за сложности конструкции и технологических процессов стоимость транзисторов значительно превышает цену диодов, что делает их объёмно

ектом активного изучения ведущих производителей полупроводниковых приборов и международных исследовательских центров [2–4]. Силовые биполярные SiC-приборы распространены значительно меньше из-за проблем с деградацией $p-n$ -переходов при протекании больших прямых токов [5]. В этой группе приборов можно выделить мощные высоковольтные 4H-SiC-ключи наносекундного и субнаносекундного диапазонов (дрейфовые диоды с резким восстановлением – ДДРВ), которые имеют ряд преимуществ по сравнению с кремниевыми аналогами и позволяют создавать генераторы сверхкоротких импульсов напряжения для различных технических применений [6–10].

Известно [11], что силовые вертикальные транзисторы состоят из массива базовых ячеек (рис. 1, а), что позволяет эффективно использовать площадь полупроводникового кристалла и формировать транзистор с низким сопротивлением во включенном состоянии. При этом в настоящее время актуален вопрос оптимизации конструкции ячейки, целью которой является минимизация удельного сопротивления во включенном состоянии устройства при сохранении требуемого блокирующего напряжения [12]. В конструкции элементарной ячейки также

должен предусматриваться запас по надежности, в частности, должна быть ограничена напряженность электрического поля в подзатворном диэлектрике, минимизировано проявление эффекта инжекции горячих электронов, исключено короткое замыкание в результате срабатывания паразитного $n-p-n$ -транзистора при высоких скоростях переключения прибора. Некорректная конструкция элементарной ячейки MOSFET может не только повлиять на сопротивление транзистора во включенном состоянии, но и ограничить его блокирующее напряжение, диапазон управляющих напряжений и надежность устройства в целом. В силовых транзисторах наиболее часто используют линейные (рис. 1, б), прямоугольные (квадратные) и гексагональные (рис. 1, в) ячейки [11].

В отличие от линейной прямоугольная и гексагональная топологии ячейки обеспечивают более высокую плотность упаковки ячеек на единицу площади, что позволяет достичь более низкого сопротивления транзистора во включенном состоянии [13]. Однако в силовых 4H-SiC-MOSFET с прямоугольной и гексагональными топологиями ячеек возможно превышение максимально допустимой напряженности электрического поля на границе раздела

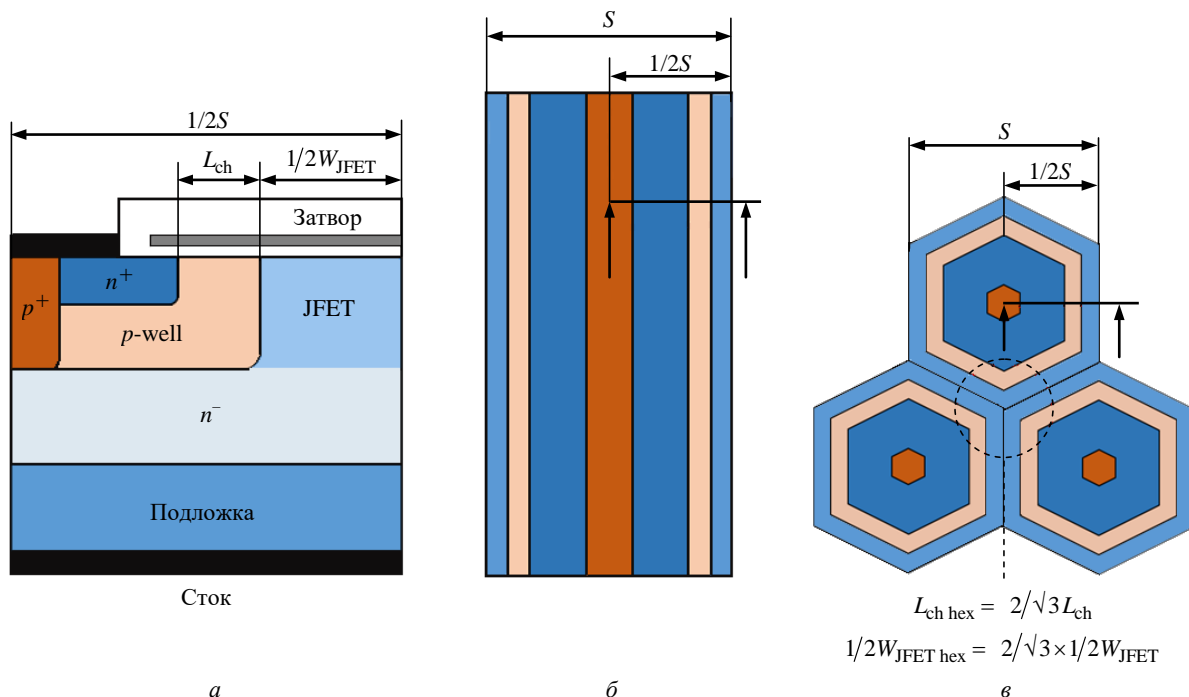


Рис. 1. SiC-MOSFET: а – разрез 1/2 ячейки; б – линейная топология ячейки; в – гексагональная топология ячейки
 Fig. 1. SiC-MOSFET: а – half-cell cross-section; б – linear cell topology; в – hexagonal cell topology

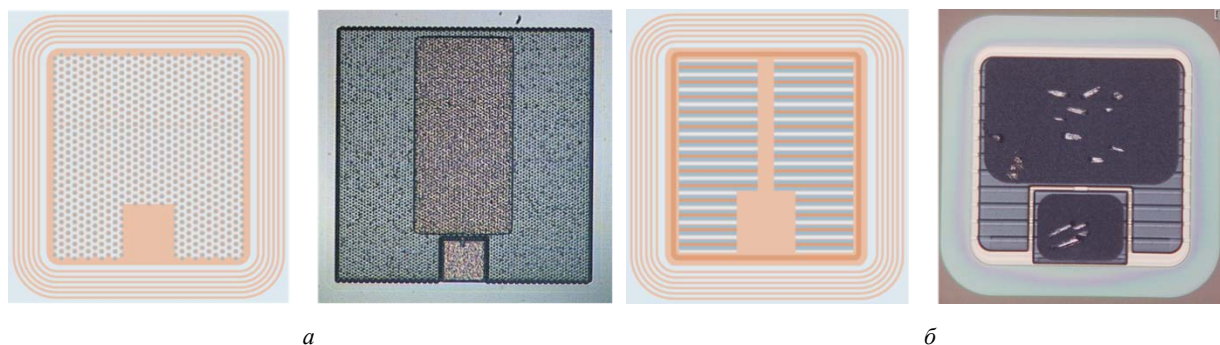


Рис. 2. Топологии (ионно-легированные области) и фотографии чипов 4H-SiC-MOSFET с $S_{\text{акт}} = 0.96 \text{ мм}^2$ с ячейками: *a* – гексагональными; *б* – линейными

Fig. 2. Topologies (ion-doped regions) and photos of 4H-SiC-MOSFET chips with $S_{\text{акт}} = 0.96 \text{ мм}^2$ with cells: *a* – hexagonal; *б* – linear

SiO₂/SiC. Этот эффект снижает надежность подзатворного диэлектрика. Он обусловлен неравномерностью ширины JFET-области, которая заключена между соседними *p*-well-областями транзистора (рис. 1, в). Кроме того, в прямоугольных и гексагональных ячейках наблюдается пространственная анизотропия проводимости и порогового напряжения [1]. Совокупность вышеуказанных эффектов нивелирует геометрическое преимущество прямоугольных и гексагональных ячеек относительно ячеек с линейной топологией.

Настоящая статья посвящена анализу характеристик лабораторных образцов силовых 4H-SiC-MOSFET с базовыми ячейками гексагонального и линейного типов с максимальным рабочим напряжением 1000 В при идентичных конструктивно-технологических параметрах ячеек. Проводится характеристика разработанных и изготовленных полевых транзисторов по напряжению пробоя и распределению основных параметров.

Материалы и методы исследований. Объектами исследований являлись лабораторные образцы 4H-SiC-MOSFET с ячейками гексагонального и линейного типов, спроектированные на напряжения до 1200 В. На рис. 1, *a* представлена активная часть (1/2 ячейки) силового SiC-MOSFET, состоящая из *n*⁻-слоя (дрейфовая область, толщиной 11 мкм и уровнем легирования $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) с имплантированными в него *p*-well- (ретроградный профиль легирования [2]), *n*⁺- и *p*⁺-областями. Сильнолегированная *p*⁺-область выполняет роль контакта к области *p*-well и формируется для выравнивания потенциала между *p*-well и истоком для нейтрализации паразитного *n-p-n*-транзистора. Транзисторы обоих типов имели длину канала

$L_{\text{ch}} = 1 \text{ мкм}$, ширину JFET-области $W_{\text{JFET}} = 3.0 \text{ мкм}$ и идентичную краевую защиту. Площадь активной области 4H-SiC-MOSFET составляла $S_{\text{акт}} = 0.96 \text{ мм}^2$. На рис. 2 представлены эскизы топологий ионно-имплантированных областей транзисторов и их фотографии. Транзисторы были изготовлены по технологическому маршруту, который был описан в [14–16].

С целью увеличения тока, отбираемого с каждого кристалла, был предложен дизайн ячейки с увеличенной площадью активной области $S_{\text{акт}} = 5.4 \text{ мм}^2$ в линейной топологии с уменьшенными размерами канала $L_{\text{ch}} = 0.7 \text{ мкм}$ и шириной JFET-области $W_{\text{JFET}} = 1.8 \text{ мкм}$. Данный тип транзисторов изготавливался на основе 4H-SiC-эпиструктур диаметром 100 мм с аналогичными описанным ранее параметрами. Оптическое изображение чипа (*a*) и РЭМ-изображение сечения ячейки (*б*) приведены на рис. 3.

Исследование топологии образцов транзисторов с площадью активной области $S_{\text{акт}} = 0.96 \text{ мм}^2$ (линейный и гексагональный дизайн ячеек) и площадью 5.4 мм^2 (линейный дизайн ячеек) проводилось на оптическом микроскопе КН-7700 (Nigox), поперечные сечения структур транзисторов – на растровом электронном микроскопе FEI Quanta INSPECT. Электрические параметры и характеристики всех образцов измерялись на характеристикографе Keysight B1505A.

Результаты исследования. На рис. 4 представлены выходные вольт-амперные характеристики (ВАХ) лабораторных образцов 4H-SiC-MOSFET малой площади, измеренные на характеристикографе Keysight B1505A. Из рисунка видно, что транзисторы с гексагональной топологией

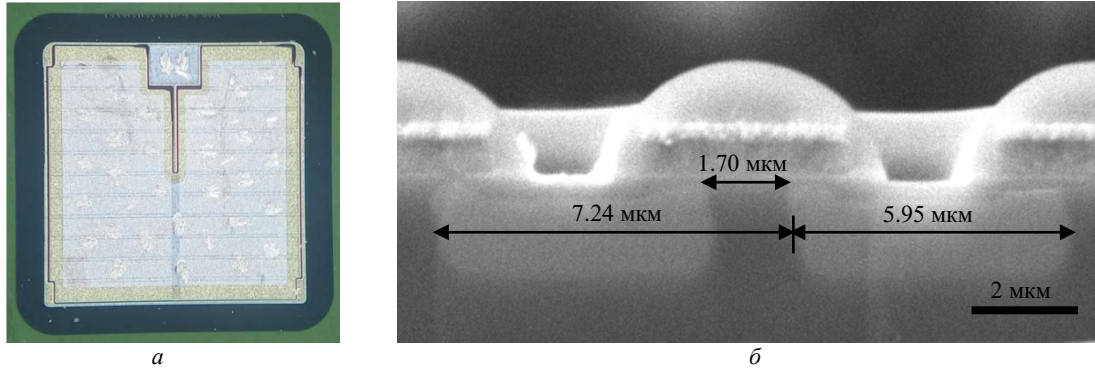


Рис. 3. Фотография чипа (а) и РЭМ-изображение сечения ячейки (б) 4H-SiC-MOSFET с $S_{акт} = 5.4 \text{ мм}^2$

Fig. 3. Top view (a) and SEM cell cross-section (b) of the 4H-SiC-MOSFET with $S_{акт} = 5.4 \text{ мм}^2$

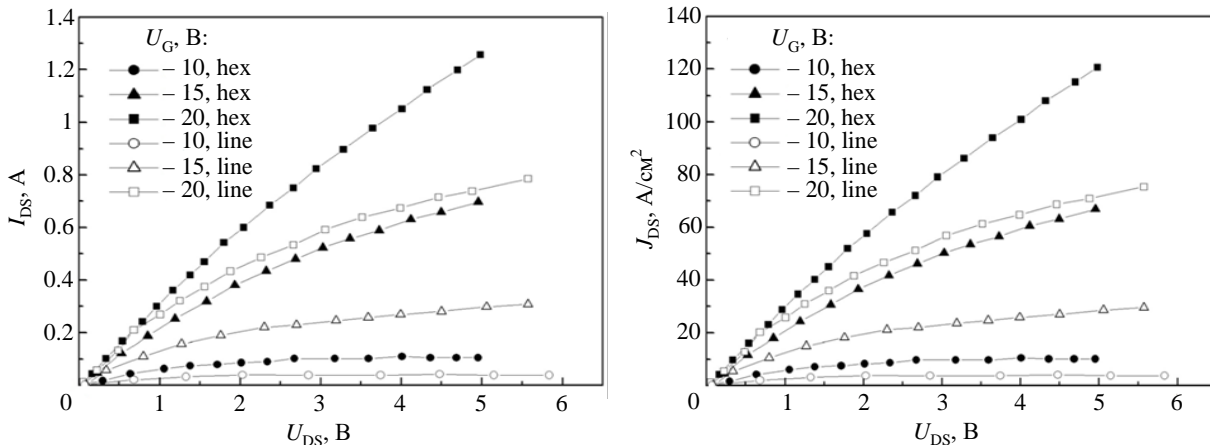


Рис. 4. Выходные ВАХ 4H-SiC-MOSFET ($S_{акт} = 0.96 \text{ мм}^2$) с линейной и гексагональной топологиями ячеек

Fig. 4. Output characteristics of 4H-SiC-MOSFET ($S_{акт} = 0.96 \text{ мм}^2$) with linear and hexagonal cell topology

ячеек ввиду более высокой плотности их размещения, в отличие от структур с линейной топологией, характеризуются более высокими значениями коммутируемых токов. При этом максимальная плотность тока $J_{DS} = 125 \text{ А/см}^2$ не является критической для карбида кремния [14]. Значения удельного сопротивления обоих транзисторов в открытом состоянии (при $U_G = 20 \text{ В}$) были практически равными и составляли $R_{он,сп} = 32 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$. Насыщение ВАХ (при $U_G = 20 \text{ В}$) 4H-SiC-MOSFET с линейной топологией обусловлено меньшей шириной JFET-области в отличие от транзисторов с гексагональной топологией, где в месте стыка соседних ячеек W_{JFET} в 1.15 раза больше (рис. 1, в).

4H-SiC-MOSFET были изготовлены в рамках лабораторного технологического маршрута без использования технологии формирования самосовмещенного канала [17, 18]. Для созда-

ния области канала применялась операция прямой фотолитографии, что, вероятно, вызвало большой разброс значений параметров транзисторов обоих типов. При этом в 4H-SiC-MOSFET с гексагональными ячейками, в отличие от структур с линейной топологией, наблюдался больший разброс по значениям порогового напряжения (U_{th}) и сопротивления транзистора во включенном состоянии ($R_{он}$). Поэтому дальнейшие исследования были направлены на проектирование и изготовление лабораторных образцов 4H-SiC-MOSFET с оптимизированными параметрами ячейки линейного типа, как более надежной и простой в технической реализации.

Выходные ВАХ транзисторов с линейной топологией ячеек ($S_{акт} = 5.4 \text{ мм}^2$) представлены на рис. 5. Из рисунка видно, что плотность коммутируемого тока при $U_G = 20 \text{ В}$ составляет $J_{DS} = 350 \text{ А/см}^2$. Достигнутое удельное сопротивление

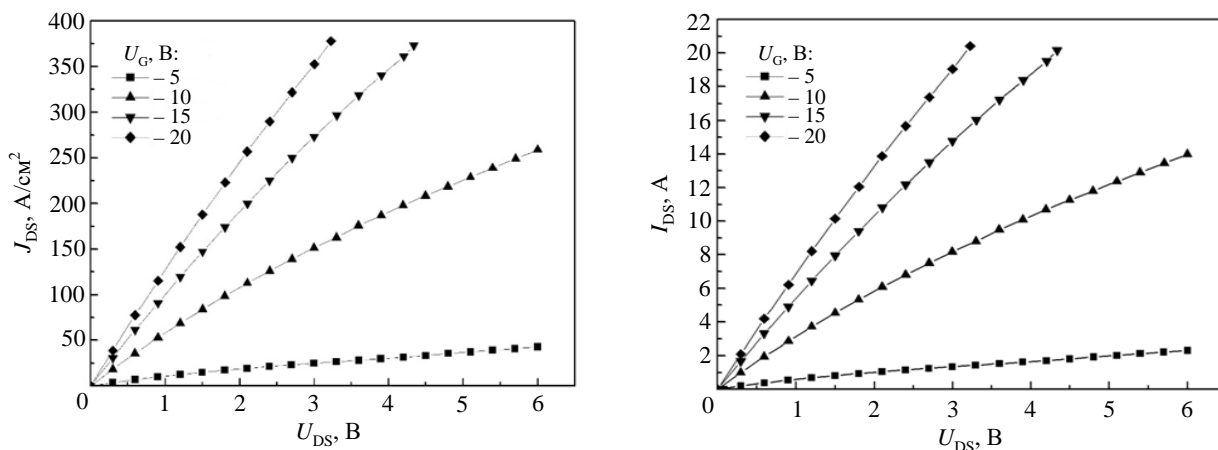


Рис. 5. Выходные ВАХ 4H-SiC-MOSFET с $S_{\text{акт}} = 5.4 \text{ мм}^2$

Fig. 5. Output characteristics of 4H-SiC-MOSFET with $S_{\text{акт}} = 5.4 \text{ mm}^2$

для транзисторов данного типа в открытом состоянии (при $U_G = 20 \text{ В}$) составляло $7 \dots 8 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$, которое как минимум в 4 раза ниже $R_{\text{он,сп}}$ рассмотренных 4H-SiC-MOSFET. Следует отметить, что в настоящее время последнее поколение коммерческих 4H-SiC-MOSFET характеризуется величиной $R_{\text{он,сп}} < 4 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$ [19], что обеспечивается применением технологий самосовмещенного канала и литографии высокого разрешения.

Транзисторы всех типов характеризовались напряжениями пробоя $800 \dots 1000 \text{ В}$ (рис. 6, а, б). На ряде образцов наблюдалось характерное свечение периферийных участков (рис. 7, а) с последующим их выгоранием (рис. 7, б). Данный факт связан с пробоем транзистора по краевой защите, который наступает ранее объемного пробоя активных областей. При этом дрейфовый n^- -SiC эпитаксиальный слой (рис. 1, а) по своим

параметрам обеспечивает возможность работы транзистора до напряжения 1200 В .

На рис. 8 приведены распределения основных параметров лабораторных образцов 4H-SiC-MOSFET с $S_{\text{акт}} = 5.4 \text{ мм}^2$ по пластине диаметром 100 мм . Транзисторы характеризовались максимальными напряжениями $U_{\text{max}} = 800 \dots 1000 \text{ В}$ (рис. 8, б). Однако значения пороговых напряжений для большинства транзисторов были более 6 В (рис. 8, в). Для незначительной части образцов U_{th} составляло $4 \dots 5 \text{ В}$ и соответствовало расчетным параметрам при $R_{\text{он}} = 100 \dots 150 \text{ мОм}$ (рис. 8, з). Таким образом, выход годных транзисторов по U_{max} составил более 70% , в то время как по параметру U_{th} – менее 10% . Полученные результаты указывают на необходимость дальнейшей оптимизации технологического маршрута изготовления транзисторов в части улучшения процента выхода годных транзисторов, особенно по параметру U_{th} .

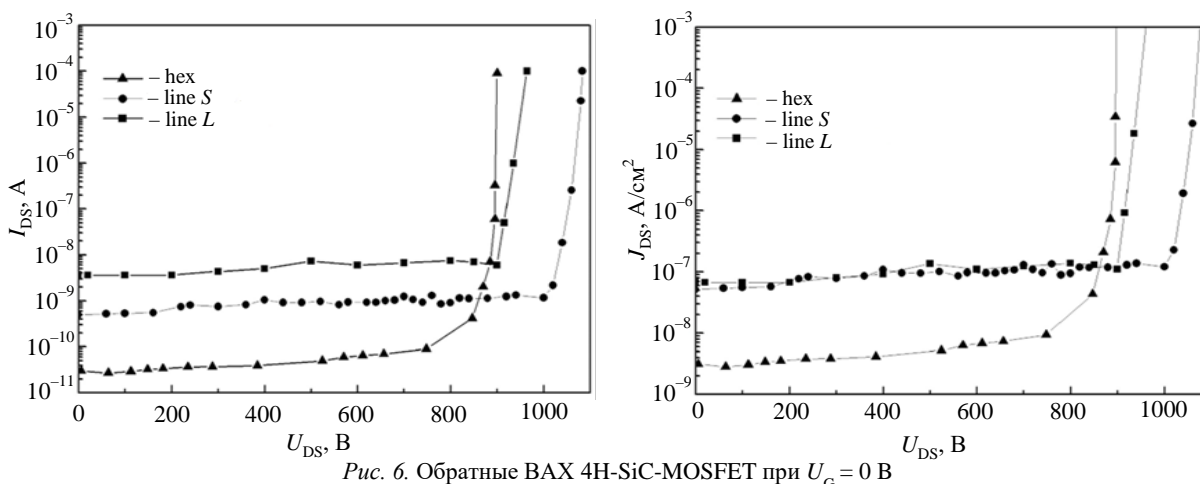


Рис. 6. Обратные ВАХ 4H-SiC-MOSFET при $U_G = 0 \text{ В}$

Fig. 6. Reverse characteristics of 4H-SiC-MOSFET at $U_G = 0 \text{ В}$

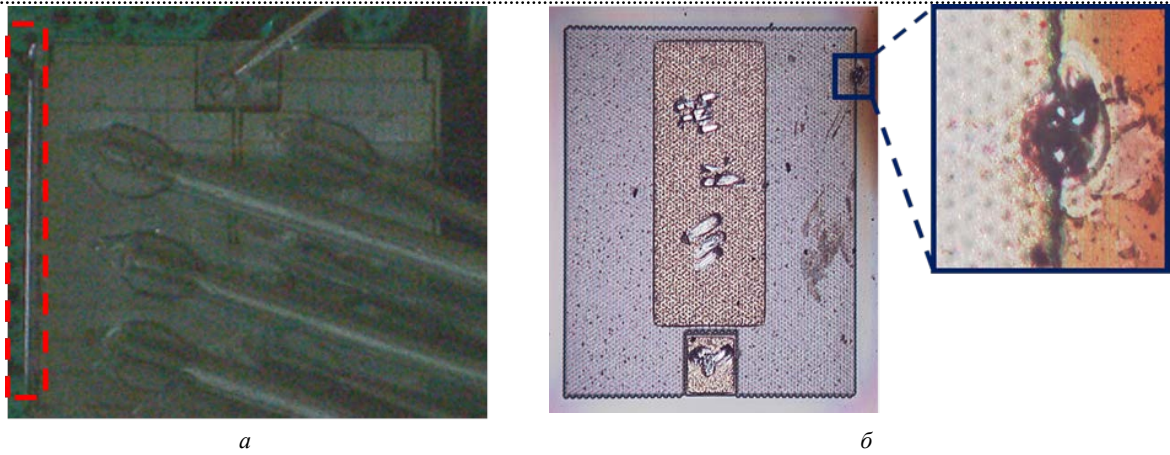


Рис. 7. Пробой периферийных областей 4H-SiC-MOSFET: а – транзистор большой площади (область пробойного свечения выделена); б – транзистор малой площади с гексагональными ячейками (область выгорания выделена)
 Fig. 7. Breakdown at edge regions of the 4H-SiC-MOSFET: а – a large-area transistor (the area of the breakdown glow is highlighted); б – a small-area transistor with hexagonal cells (the burnout area is shown in the inset)

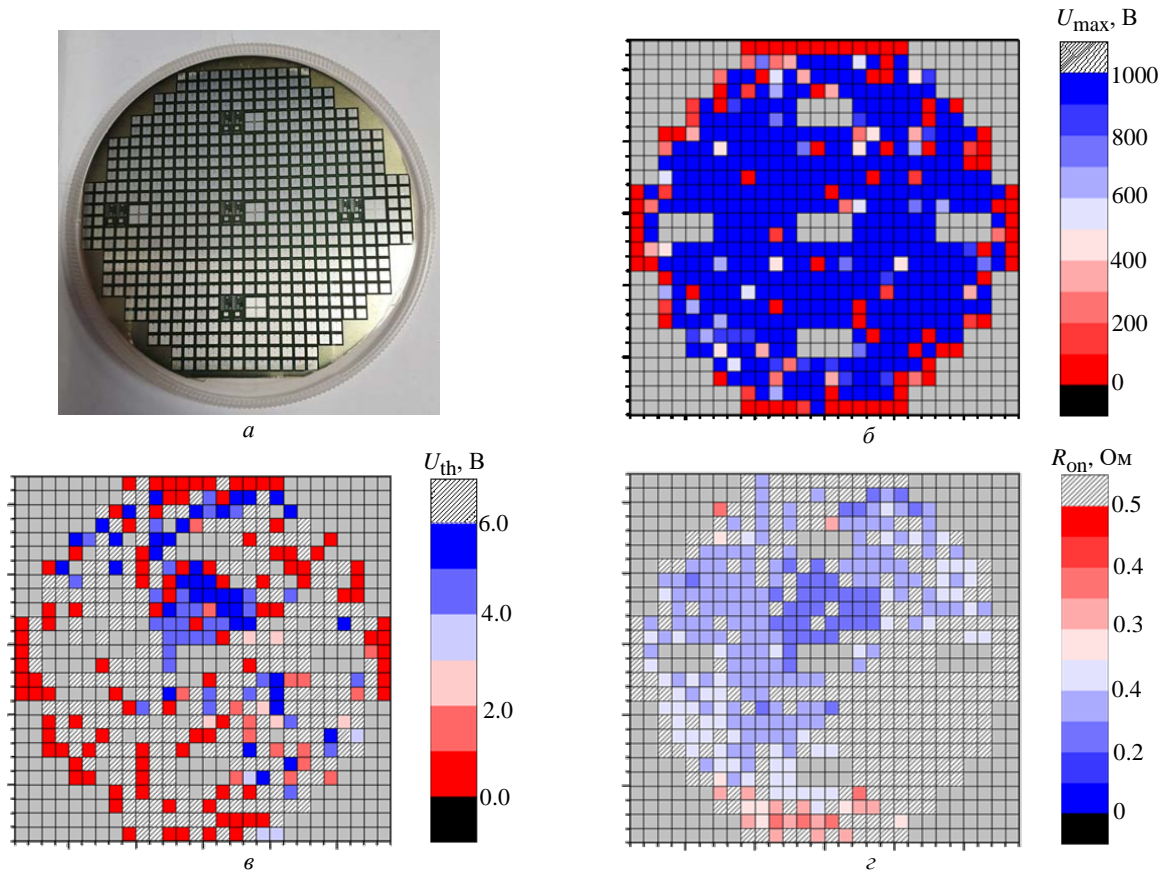


Рис. 8. Пластина диаметром 100 мм с чипами 4H-SiC-MOSFET ($S_{\text{акт}} = 5.4 \text{ мм}^2$):
 а – фотография пластины с транзисторами; б – карта распределения U_{max} ;
 в – карта распределения U_{th} (при $U_G = U_{\text{DS}}$; $I_{\text{DS}} = 5 \text{ мА}$); г – карта распределения $R_{\text{он}}$ (при $U_G = 20 \text{ В}$)

Fig. 8. Processed 100 mm wafers with 4H-SiC-MOSFET chips ($S_{\text{акт}} = 5.4 \text{ мм}^2$): а – photo of the wafer with transistors;
 б – U_{max} distribution map; в – U_{th} distribution map (at $U_G = U_{\text{DS}}$; $I_{\text{DS}} = 5 \text{ мА}$); г – $R_{\text{он}}$ distribution map (at $U_G = 20 \text{ В}$)

Заключение. Проведен сопоставительный анализ характеристик лабораторных образцов силовых 4H-SiC-MOSFET с базовыми ячейками гексагонального и линейного типов с мак-

симальным рабочим напряжением 1000 В при идентичных конструктивно-технологических параметрах ячеек. Показано, что образцы транзисторов с гексагональной топологией ячеек

при равных значениях R_{on} характеризуются более высокими по отношению к транзисторам с линейной топологией значениями коммутиремых токов, но худшей воспроизводимостью параметров. По результатам измерений ВАХ показано, что напряжения начала пробоя транзисторов составляли 900...1000 В. При этом на ряде образцов происходило выгорание периферии, что связано с краевым, а не с объемным

пробоем. Лабораторные образцы с оптимизированной линейной топологией ячеек характеризовались в ~4 раза меньшим R_{on} в сравнении с образцами малой площади. Тем не менее выход годных транзисторов составил менее 10% по параметру U_{th} , что требует при переходе к серийному производству применения в маршруте их изготовления технологий самосовмещенного канала и литографии высокого разрешения.

Авторский вклад

Афанасьев Алексей Валентинович – определение областей исследования и постановка задачи; руководство научными исследованиями; подготовка статьи.

Афанасьев Петр Валентинович – моделирование технологических процессов изготовления 4H-SiC-DMOSFET.

Ильин Владимир Алексеевич – обсуждение и анализ результатов исследований.

Серков Антон Валерьевич – разработка базовых операций создания 4H-SiC-DMOSFET.

Трушлякова Валентина Владимировна – исследования параметров 4H-SiC-DMOSFET методами оптической и электронной микроскопии.

Чигирев Дмитрий Алексеевич – разработка технологического маршрута изготовления 4H-SiC-DMOSFET.

Шевченко Сергей Александрович – моделирование транзисторов с линейной топологией ячеек.

Восколович Алексей – электрические измерения параметров 4H-SiC-DMOSFET, обработка экспериментальных результатов.

Пологов Семен Александрович – моделирование 4H-SiC-DMOSFET с гексагональной топологией ячеек.

Author's contribution

Aleksei V. Afanasev, defining research areas and setting the task; managing scientific research; preparing the article.

Petr V. Afanasev, modeling of technological processes for manufacturing 4H-SiC-DMOSFET.

Vladimir A. Ilyin, discussion and analysis of research results.

Anton V. Serkov, development of basic operations for creating 4H-SiC-DMOSFET.

Valentina V. Trushlyakova, studies of 4H-SiC-DMOSFET parameters using optical and electron microscopy methods.

Dmitry A. Chigirev, development of a technological route for the fabrication of 4H-SiC-DMOSFET.

Sergey A. Shevchenko, modeling of 4H-SiC-DMOSFET with linear cell topology.

Alexey Voskolovich, electrical measurements of 4H-SiC-DMOSFET parameters, processing of experimental results.

Semyon A. Pologov, modeling of 4H-SiC-DMOSFET with hexagonal cell topology.

Список литературы

1. Kimoto T., Cooper J. A. Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices and applications. Singapore: John Wiley & Sons, 2014. 538 p. doi: 10.1002/9781118313534

2. Афанасьев А. В., Ильин В. А., Лучинин В. В. Ионное легирование карбида кремния в технологии приборов силовой электроники. Обзор // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27, № 4. С. 439–462. doi: 10.24151/1561-5405-2022-27-4-439-462

3. Östling M. Silicon Carbide Power Devices: Evolution, Applications, and Future Opportunities // IEEE Electron Devices Magazine. 2024. Vol. 2, № 4. P. 30–35. doi: 10.1109/MED.2024.3476162

4. Review and Outlook on GaN and SiC Power Devices: Industrial State-of-the-Art, Applications, and Perspectives / M. Buffolo, D. Favero, A. Marcuzzi, C. De Santi, G. Meneghesso, E. Zanoni, M. Meneghini // IEEE Trans. on Electron Devices. 2024. Vol. 71, № 3. P. 1344–1355. doi: 10.1109/TED.2023.3346369

5. Konrath J. P. Review on Modeling and Mitigation of Bipolar Degradation in 4H-SiC // Power Electronic Devices and Components. 2024. Vol. 7. P. 100062-1–100062-8.

doi: 10.1016/j.pedc.2024.100062

6. Sub-nanosecond semiconductor opening switches based on 4H-SiC $p^+p_0n^+$ -diodes / I. V. Grekhov, P. A. Ivanov, D. V. Khristyuk, S. V. Korotkov, T. P. Samsonova, A. O. Konstantinov // Solid-State Electronics. 2003. Vol. 47, № 10. P. 1769–1774. doi: 10.1016/S0038-1101(03)00157-6

7. Superfast drift step recovery diodes (DSRDS) and vacuum field emission diodes based on 4H-SiC / A. V. Afanasyev, B. V. Ivanov, V. A. Ilyin, A. F. Kardosysoev, M. A. Kuznetsova, V. V. Luchinin // Materials Science Forum. 2013. Vol. 740–742. P. 1010–1013. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.740-742.1010

8. 30 kV pulse diode stack based on 4H-SiC / V. A. Ilyin, A. V. Afanasyev, Yu. A. Demin, B. V. Ivanov,

A. F. Kardo-Sysoev, V. V. Luchinin, S. A. Reshanov, A. Schöner, K. A. Sergushichev, A. A. Smirnov // Materials Science Forum. 2018. Vol. 924. P. 841–844.

doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.924.841

9. Мегаваттный генератор наносекундных импульсов на основе карбидокремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением / А. В. Афанасьев, Ю. А. Демин, Б. В. Иванов, В. А. Ильин, В. В. Лучинин, К. А. Сергушичев, А. А. Смирнов, А. Ф. Кардо-Сысоев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2015. № 3. С. 21–24.

10. Пат. 2836475 С1 РФ МПК H10D 8/00. Дрейфовый диод с резким восстановлением обратного сопротивления на основе карбида кремния политаипа 4H / А. В. Афанасьев, О. В. Афанасьева, П. В. Афанасьев, В. В. Вересоой, В. А. Ильин, Б. В. Иванов, А. В. Серков, Д. А. Чигирев, С. А. Шевченко. Опубл. 17.03.2025. 11 с.

11. Baliga B. J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. Cham: Springer, 2019. 1086 p.
doi: 10.1007/978-3-319-93988-9

12. Müting J., Grossner U. Simulation-Based Sensitivity Analysis of Conduction and Switching Losses for Silicon Carbide Power MOSFETs // Materials Science Forum. 2018. Vol. 924. P. 693–696.

doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.924.693

13. Agarwal A., Han K., Baliga B. J. Assessment of Linear, Hexagonal, and Octagonal Cell Topologies for 650 V 4H-SiC Inversion-Channel Planar-Gate Power JBSFETs Fabricated With 27 nm Gate Oxide Thickness // IEEE J. of the Electron Devices Society. 2021. Vol. 9. P. 79–88.

doi: 10.1109/JEDS.2020.3040353

14. Отечественная карбидокремниевая электронная компонентная база – силовой SiC МДП-транзистор / А. В. Афанасьев, В. А. Ильин, В. В. Лучинин, А. И. Михайлов, С. А. Решанов, А. Schöner // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 5. С. 308–316.

15. Газофазная эпитаксия – ключевая технология силовых МДП-транзисторов на карбиде кремния / А. В. Афанасьев, В. А. Ильин, В. В. Лучинин, А. И. Михайлов // Наноиндустрия. 2018. № 7–8. С. 488–497.

16. О формировании низкоомных контактов для биполярных приборов на основе 4H-SiC / А. В. Афанасьев, В. А. Ильин, В. В. Лучинин, А. В. Серков, Д. А. Чигирев // Физика и техника полупроводников. 2022. Т. 56, вып. 6. С. 607–610.

doi: 10.21883/FTP.2022.06.52598.9827

17. Matin M., Saha A., Cooper J. A. A self-aligned process for high-voltage, short-channel vertical DMOSFETs in 4H-SiC // IEEE Transactions on Electron Devices. 2004. Vol. 51, № 10. P. 1721–1725.
doi: 10.1109/TED.2004.835622

18. A Channel Self-Alignment process for High-Voltage VDMOSFETs in 4H-SiC / H. Ge, T. Zhu, S. Chang, W. Zhao, X. Bai // J. of Physics: Conf. Series. 2021. Vol. 2083, № 2. P. 022092-1–022092-7.
doi: 10.1088/1742-6596/2083/2/022092

19. Stpower Gen3 SiC MOSFETs Ideal for EV. URL: <https://www.st.com/resource/en/flyer/flgen3sicev.pdf> (дата обращения: 25.05.2025).

Информация об авторах

Афанасьев Алексей Валентинович – кандидат технических наук (1999), директор Института силовой электроники и фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 70 научных работ. Сфера научных интересов – физика полупроводниковых приборов; микро- и нанoeлектроника; фотоника; компоненты силовой электроники; широкозонные полупроводники; технологии материалов и приборов микро- и нанoeлектроники.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: avafanasev@etu.ru

Афанасьев Петр Валентинович – кандидат технических наук (2006), старший научный сотрудник Института силовой электроники и фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – компоненты силовой электроники; широкозонные полупроводники; технологии материалов и приборов микро- и нанoeлектроники.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: pvafanasev@etu.ru

Ильин Владимир Алексеевич – кандидат физико-математических наук (1981), ведущий научный сотрудник Института силовой электроники и фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – физика полупроводниковых приборов; микро- и нанoeлектроника; методы анализа материалов и структур микро- и нанoeлектроники; широкозонные полупроводники.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: ilyincmid@gmail.com

Серков Антон Валерьевич – магистр техники и технологии по направлению "Электроника и микроэлектроника" (2011, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова

(Ленина)) научный сотрудник Института силовой электроники и фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – широкозонные полупроводники; технологии материалов и приборов микро- и наноэлектроники; технологические процессы микро- и наноэлектроники и оборудование.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: av.serkov@yandex.ru

Трушлякова Валентина Владимировна – кандидат технических наук (2008), научный сотрудник Института силовой электроники и фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), доцент кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – полупроводниковая электроника; микро- и наноэлектроника; методы анализа материалов и структур микро- и наноэлектроники; технологии материалов и приборов микро- и наноэлектроники.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: vvtrushliakova@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5812-1890>

Чигирев Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук (2012), научный сотрудник Института силовой электроники и фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – технологии материалов и приборов микро- и наноэлектроники; технологические процессы микро- и наноэлектроники и оборудование; электрическая характеристика приборов силовой электроники.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: dachigirev@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6657-0992>

Шевченко Сергей Александрович – кандидат технических наук (2021), доцент кафедры микроволновой электроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – физика полупроводниковых приборов; компоненты силовой электроники; широкозонные полупроводники; СВЧ-электроника; моделирование полупроводниковых приборов силовой электроники.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: sashevchenko@etu.ru

Восколович Алексей – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2025, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор четырех научных публикаций. Сфера научных интересов – компоненты силовой электроники; технологии материалов и приборов микро- и наноэлектроники; электрическая характеристика приборов силовой электроники.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aleksey.voskolovich@mail.ru

Пологов Семен Александрович – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2022, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 5 научных работ. Сфера научных интересов – компоненты силовой электроники, широкозонные полупроводники, моделирование приборов силовой электроники и технологических процессов.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: pologov_semen@mail.ru

References

1. Kimoto T., Cooper J. A. Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices and Applications. Singapore, John Wiley & Sons, 2014, 538 p. doi: 10.1002/9781118313534.

2. Afanasyev A. V., Ilyin V. A., Luchinin V. V. Ion Doping of Silicon Carbide in the Technology of Power Electronics Devices. Review. Electronics. 2022, vol. 27, no. 4, pp. 439–462. (In Russ.)

doi: 10.24151/1561-5405-2022-27-4-439-462

3. Östling M. Silicon Carbide Power Devices: Evolution, Applications, and Future Opportunities. IEEE Electron Devices Magazine. 2024, vol. 2, no. 4, pp. 30–35.

doi: 10.1109/MED.2024.3476162

4. Buffolo M., Favero D., Marcuzzi A., De Santi C., Meneghesso G., Zanoni E., Meneghini M. Review and Outlook on GaN and SiC Power Devices: Industrial State-of-the-Art, Applications, and Perspectives. IEEE Transactions on Electron Devices. 2024, vol. 71, no. 3, pp. 1344–1355.

doi: 10.1109/TED.2023.3346369

5. Konrath J. P. Review on Modeling and Mitigation of Bipolar Degradation in 4H-SiC. Power Electronic Devices and Components. 2024, vol. 7, pp. 100062-1–100062-8.

doi: 10.1016/j.pedc.2024.100062

6. Grekhov I. V., Ivanov P. A., Khristyuk D. V., Korotkov S. V., Samsonova T. P., Konstantinov A. O. Sub-Nanosecond Semiconductor Opening Switches Based on 4H-SiC $p^+p_0n^+$ -Diodes. Solid-State Electronics. 2003, vol. 47, no. 10, pp. 1769–1774.

doi: 10.1016/S0038-1101(03)00157-6

7. Afanasyev A. V., Ivanov B. V., Ilyin V. A., Kardo-Sysoev A. F., Kuznetsova M. A., Luchinin V. V. Superfast Drift Step Recovery Diodes (DSRDS) and Vacuum Field Emission Diodes Based on 4H-SiC. Materials Science Forum. 2013, vol. 740–742, pp. 1010–1013.

doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.740-742.1010

8. Ilyin V. A., Afanasyev A. V., Demin Yu. A., Ivanov B. V., Kardo-Sysoev A. F., Luchinin V. V., Reshanov S. A., Schöner A., Sergushichev K. A., Smirnov A. A. 30 kV Pulse Diode Stack Based on 4H-SiC. Materials Science Forum. 2018, vol. 924, pp. 841–844.

doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.924.841

9. Afanasyev A. V., Demin Yu. A., Ivanov B. V., Ilyin V. A., Luchinin V. V., Sergushichev K. A., Smirnov A. A., Kardo-Sysoev A. F. Megawatt Generator of Nanosecond Pulses Based on Silicon Carbide Drift Diodes with Sharp Recovery. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2015, no. 3, pp. 21–24. (In Russ.)

10. Afanasyev A. V., Afanasyeva O. V., Afanasyev P. V., Veresooi V. V., Ilyin V. A., Ivanov B. V., Serkov A. V., Chigirev D. A., Shevchenko S. A. *Dreyfovyy diod s rezkim vosstanovleniyem obratnogo soprotivleniya na osnove karbida kremniya politipa 4H* [Drift Diode with

Sharp Recovery of Reverse Resistance Based on Silicon Carbide Polytype 4H]. Patent no. 2836475 C1, 2024. (In Russ.)

11. Baliga B. J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. Cham, Springer, 2019, 1086 p.

doi: 10.1007/978-3-319-93988-9

12. Mütting J., Grossner U. Simulation-Based Sensitivity Analysis of Conduction and Switching Losses for Silicon Carbide Power MOSFETs. Materials Science Forum. 2018, vol. 924, pp. 693–696.

doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.924.693

13. Agarwal A., Han K., Baliga B. J. Assessment of Linear, Hexagonal and Octagonal Cell Topologies for 650 V 4H-SiC Inversion-Channel Planar-Gate Power JBSFETs Fabricated With 27 nm Gate Oxide Thickness. IEEE J. of the Electron Devices Society. 2021, vol. 9, pp. 79–88.

doi: 10.1109/JEDS.2020.3040353

14. Afanasyev A. V., Ilyin V. A., Luchinin V. V., Mikhailov A. I., Reshanov S. A., Schöner A. National Silicon Carbide Electronic Component Base – Power SiC MOSFET Transistor. Nano- and Microsystems Technology. 2016, vol. 18, no. 5, pp. 308–316. (In Russ.)

15. Afanasyev A. V., Ilyin V. A., Luchinin V. V., Mikhailov A. I. Gas-Phase Epitaxy Is A Key Technology for Power MOSFET on Silicon Carbide. Nanoindustry. 2018, no. 7–8, pp. 488–497. (In Russ.)

16. Afanasyev A. V., Ilyin V. A., Luchinin V. V., Serkov A. V., Chigirev D. A. On the Formation of Low-Resistance Contacts for Bipolar Devices Based on 4H-SiC. Physics and Technology Of Semiconductors. 2022, vol. 56, no. 6, pp. 607–610. (In Russ.)

17. Matin M., Saha A., Cooper J. A. A Self-Aligned Process for High-Voltage, Short-Channel Vertical DMOSFETs in 4H-SiC. IEEE Transactions on Electron Devices. 2004, vol. 51, no. 10, pp. 1721–1725.

doi: 10.1109/TED.2004.835622

18. Ge H., Zhu T., Chang S., Zhao W., Bai X. A Channel Self-Alignment process for High-Voltage VDMOSFETs in 4H-SiC. J. of Physics: Conference Series. 2021, no. 2083, pp. 022092-1–022092-7.

doi: 10.1088/1742-6596/2083/2/022092

19. Stpower Gen3 SiC MOSFETs Ideal for EV. Available at: <https://www.st.com/resource/en/flyer/flgen3sicev.pdf> (accessed 25.05.2025).

Information about the authors

Aleksei V. Afanasev, Cand. Sci. (Eng.) (1999), Director of the Power Electronics and Photonics Institute of Saint Petersburg Electrotechnical University, Associated Professor of the Micro- and Nanoelectronics Department of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: physics of semiconductor devices; micro-nanoelectronics; power electronics components; wide-bandgap semiconductors; technologies of materials and devices of micro-nanoelectronics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: avafanasev@etu.ru

Petr V. Afanasev, Cand. Sci. (Eng.) (2006), Senior Researcher of the Power Electronics and Photonics Institute of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: power electronics components; wide bandgap semiconductors; materials and micro-nanoelectronics devices technologies.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: pvafanasev@etu.ru

Vladimir A. Ilyin, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (1981), Leading Researcher of the Power Electronics and Photonics Institute of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: physics of semiconductor devices; micro-nanoelectronics; methods of analysis of materials and structures of micro-nanoelectronics; wide-bandgap semiconductors.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: ilyincmid@gmail.com

Anton V. Serkov, Master's degree in Electronics and Microelectronics (2011, Saint Petersburg Electrotechnical University), Researcher of the Power Electronics and Photonics Institute of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: wide-bandgap semiconductors; technologies of materials and devices of micro-nanoelectronics; technological processes of micro-nanoelectronics and equipment.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: av.serkov@yandex.ru

Valentina V. Trushlyakova, Cand. Sci. (Eng.) (2008), Researcher of the Power Electronics and Photonics Institute of Saint Petersburg Electrotechnical University, Associated Professor of the Micro- and Nanoelectronics Department of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: semiconductor electronics; micro-nanoelectronics, methods of analysis of materials and structures of micro-nanoelectronics; technologies of materials and devices of micro-nanoelectronics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: vvrushliakova@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5812-1890>

Dmitry A. Chigirev, Cand. Sci. (Eng.) (2012), Researcher of the Power Electronics and Photonics Institute of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: micro-nanoelectronics materials and device technologies; micro-nanoelectronics technological processes and equipment; electrical characterization of power electronics devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: dachigirev@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6657-0992>

Sergey A. Shevchenko, Cand. Sci. (Eng.) (2021), Associated Professor of the Microwave Electronics Department of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: physics of semiconductor devices, power electronics components; wide-bandgap semiconductors; microwave electronics; modeling of power electronics semiconductor devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: sashevchenko@etu.ru

Alexey Voskolovich, Master's degree in Electronics and Nanoelectronics (2025, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate Student of the Micro- and Nanoelectronics Department of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 4 scientific publications. Area of expertise: power electronics components; technologies of materials and devices of micro-nanoelectronics; electrical characterization of power electronics devices

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: aleksey.voskolovich@mail.ru

Semen A. Pologov, Master's degree in Electronics and Nanoelectronics (2021, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate Student of the Micro- and Nanoelectronics Department of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: power electronics components, wide bandgap semiconductors, modeling of power electronics devices and technological processes

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: pologov_semen@mail.ru
