

**DESIGN AND EVALUATION OF LOW-VOLTAGE POWER  
AlGaN/GaN/SiC SCHOTTKY BARRIER DIODE**

*Egor Sergeevich Polyntsev*<sup>1a</sup>, *Irina Yuryevna Kodorova*<sup>1</sup>,  
*Andrey Alexandrovich Aksenov*<sup>2</sup>, *Maxim Sergeevich Vorobyov*<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin ave., 634034 Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2/3 Akademicheskiiy ave., 634055 Tomsk, Russia

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University 30, Lenin ave., 634034 Tomsk, Russia

<sup>a</sup> e.polyntsev@gmail.com

**ABSTRACT**

The paper presents the results of the development and experimental evaluation of a low-voltage planar power Schottky diode based on an AlGaN/GaN heterostructure formed on a SiC substrate. The basic design of a GaN power Schottky diode with a field-effect electrode system implemented in a multi-finger GaN power Schottky diode crystal was described. A technique for pulsed measurement of the diode's current-voltage characteristic was presented, which allows eliminating the influence of self-heating. Twenty-five experimental samples of GaN power Schottky diode dies were fabricated and measured. The maximum working voltage was over 250 V, and the maximum current reached 42 A. The thermal resistance between the active region of the GaN power diode and the substrate was theoretically calculated. The advantage of using SiC substrates in terms of thermal characteristics was demonstrated. A comparison of the achieved electrical characteristics of the GaN power Schottky diode with a commercially-available silicon-based counterpart was conducted. The paper presents the results of integrating an experimental sample of a power GaN Schottky diode die into a multichip power micromodule intended for use in the secondary stage of high-power-density single-ended DC-DC converters.

**KEYWORDS**

Power electronics; power GaN; gallium nitride; planar Schottky barrier diode; power micromodule; power microassembly.

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО НИЗКОВОЛЬТНОГО  
AlGaN/GaN/SiC ДИОДА ШОТТКИ**

*Егор Сергеевич Полинцев*<sup>1a</sup>, *Ирина Юрьевна Кодорова*<sup>1</sup>,  
*Андрей Александрович Аксёнов*<sup>2</sup>, *Максим Сергеевич Воробьёв*<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634034 Томск, пр. Ленина, 40

<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, пр. Академический, 2/3

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634034 Томск, пр. Ленина, 30

<sup>a</sup> e.polyntsev@gmail.com

## АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты разработки и экспериментального исследования силового планарного низковольтного диода Шоттки на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN, сформированной на подложке из SiC. Описана базовая конструкция силового GaN диода Шоттки с системой полевых электродов, реализованная в кристалле многопальцевого силового GaN диода Шоттки. Представлена методика импульсных измерений вольтамперной характеристики диода, позволяющая исключить влияние саморазогрева. Изготовлено и измерено 25 экспериментальных образцов кристаллов силовых GaN диодов Шоттки. Максимальное рабочее напряжение составило более 250 В, а максимальный ток достигал 42 А. Теоретически рассчитана величина теплового сопротивления между активной областью силового GaN диода и подложкой. Показано преимущество использования подложек SiC с точки зрения тепловых характеристик. Проведено сравнение достигнутых электрических характеристик экспериментального образца силового GaN диода Шоттки с серийно выпускаемым кремниевым аналогом. Представлены результаты интеграции экспериментального образца силового GaN диода Шоттки в силовую микросборку, предназначенную для использования во вторичной части однотактных DC-DC преобразователей с высокой плотностью мощности.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Силовая электроника; электронная компонентная база; нитрид галлия; диод Шоттки; силовые микросборки.

### Введение

На сегодняшний день основными трендами в области импульсной силовой электроники являются стремление к повышению коэффициента полезного действия (КПД) импульсных преобразователей электрической энергии, снижение их габаритов и, как следствие, увеличение плотности мощности [1, 2]. На протяжении последних пятидесяти лет большинство силовых полупроводниковых приборов изготавливаются на основе кремния. Эти приборы практически достигли теоретического предела совершенства [3, 4]. Качественный скачок в КПД и плотности мощности импульсных преобразователей электрической энергии возможен за счет перехода к использованию нового типа электронной компонентной базы на основе широкозонных полупроводниковых материалов: карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN) [5]. Силовые приборы на основе данных материалов характеризуются более высокими рабочими напряжениями, повышенной скоростью переключения, большей

рабочей температурой и радиационной стойкостью [6]. Карбид кремниевые силовые приборы наиболее широко используются в высоковольтных (более 1200 В) и высокоэнергетических (более 10 кВт) областях применения, а нитрид галлиевые – в низковольтных применениях (до 650 В) с малыми и средними уровнями мощности (менее 10 кВт) [7].

Ключевым преимуществом силовых GaN приборов является высокая подвижность электронов (порядка 1500–2000 см<sup>2</sup>/В·с) в слое двумерного электронного газа, который появляется на гетерогранице AlGaIn/GaN [8, 9] и используется в качестве канала. Такая реализация канального слоя обеспечивает его низкое сопротивление и минимальную паразитную емкость. Благодаря отсутствию классической области объемного дрейфа (как у кремниевых, так и у карбид-кремниевых униполярных приборов), GaN транзисторы и диоды Шоттки демонстрируют рекордно низкое время обратного восстановления [10]. Это делает силовые GaN приборы перспективными для применения именно в низ-

ковольтных высокочастотных импульсных преобразователях электрической энергии, характеризующихся предельной плотностью мощности, высоким КПД и компактными габаритами [11].

Несмотря на стремительное развитие и появление в последние годы серийно выпускаемых силовых GaN транзисторов, создание высококачественных силовых диодов Шоттки на основе нитрида галлия остается сложной научно-технической задачей. Основной проблемой является выбор металла для создания барьера Шоттки, обеспечивающего компромисс между низким падением напряжения на диоде при прямом включении и малыми обратными токами диода, которые в гетероструктуре AlGaN/GaN часто возрастают из-за высокой плотности дефектов и поверхностных состояний [12]. Дополнительной сложностью является оптимизация распределения электрического поля в области анода для подавления токов утечки по периферии кристалла диода и в буферных слоях, что требует оптимизации конструкции и технологии изготовления диода [13]. В этом контексте особые перспективы приобретает использование подложек из SiC. По сравнению с наиболее широко используемыми кремниевыми подложками, SiC обеспечивает лучшее согласование параметров кристаллической решетки, что снижает плотность проникающих дислокаций в активной области прибора и, как следствие, уменьшает обратные токи утечки [14]. Кроме того, высокая теплопроводность SiC позволяет осуществлять эффективный отвод тепла от активной области кристалла диода, что особенно важно для низковольтных применений, характеризующихся высокими токами [14].

В последние годы абсолютное большинство исследований, посвященных разработке силовых GaN диодов Шоттки, было посвящено высоковольтным диодам Шоттки с рабочим напряжением более 600 В на подложках из Si. В данной работе пред-

ставлены результаты разработки и исследований планарного низковольтного силового диода Шоттки на основе гетероструктуры AlGaN/GaN, выращенной на подложке из SiC. Настоящая работа является продолжением работы [15], посвященной исследованию влияния конструкционных параметров планарных силовых GaN диодов Шоттки на их электрические характеристики.

Целью настоящей работы являлась разработка кристалла низковольтного силового GaN диода Шоттки с рабочим напряжением 250 В и прямым током более 20 А для дальнейшего его применения в силовых многокристалльных микросборках на основе керамических плат.

## 1. Методика исследований

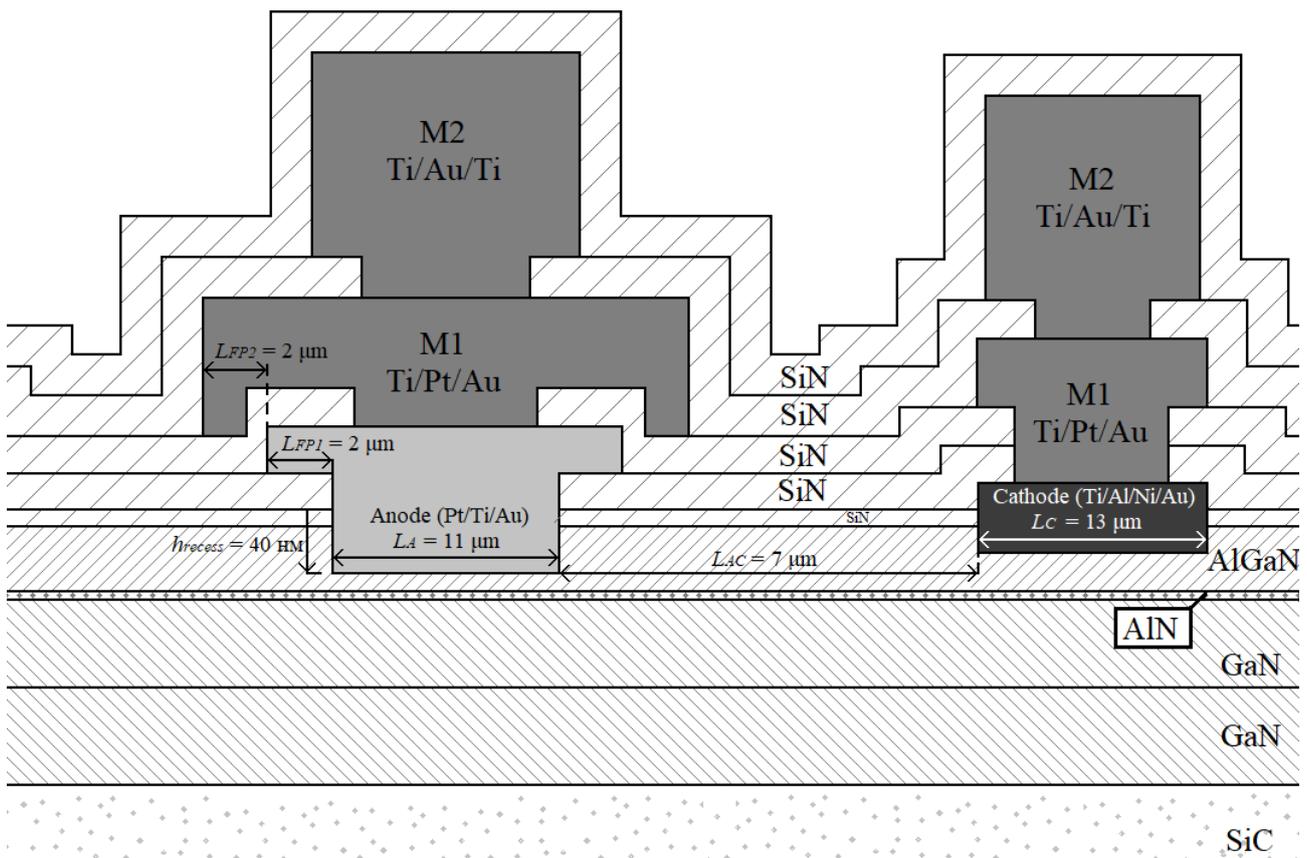
*Изготовление экспериментальных образцов силовых GaN диодов Шоттки* осуществлялось на технологической линии производства мощных сверхвысокочастотных AlGaN/GaN транзисторов с высокой подвижностью электронов. Для изготовления экспериментальных образцов силовых GaN диодов Шоттки использовались подложки из SiC диаметром 100 мм, со сформированной гетероструктурой AlGaN/GaN производства компании «Enriks Semiconductor». Параметры слоев гетероструктуры приведены в табл. 1.

Технологический маршрут изготовления силовых GaN диодов Шоттки включал 11 крупных блоков технологических операций. Ранее он был детально описан в работе [15] совместно с результатами исследований влияния конструкционных параметров на электрические характеристики силовых GaN диодов Шоттки на постоянном токе. На основе результатов данных экспериментальных исследований была разработана базовая ячейка (палец) многопальцевого силового диода Шоттки, пригодная для масштабирования для достижения нужного выходного тока. Данная конструкция в поперечном сечении представлена на рис. 1.

**Таблица 1.** Параметры гетероструктуры, использованной для создания экспериментальных образцов силовых GaN диодов Шоттки

**Table 1.** Parameters of epitaxial structure used to create experimental samples of GaN power Schottky diodes

№ / No	Материал слоя / Layer material	Толщина слоя, мкм / Layer thickness, $\mu\text{m}$	Теплопроводность, Вт/(м·К) / Thermal conductivity, W/(m·K)	Назначение слоя / Layer definition
1	SiN	0,005	54	Капсулирующий слой / Capping layer
2	AlGaN	0,022	39	Барьерный слой / Barrier layer
3	AlN	0,0008	285	Спейсер / Spacer layer
4	GaN	0,4	130	Канальный слой / Channel layer
5	GaN	1,1	130	Буферный слой / Buffer layer
6	SiC	500	370	Подложка / Substrate



**Рис. 1.** Конструкция базовой ячейки силового низковольтного многопальцевого диода Шоттки в поперечном сечении

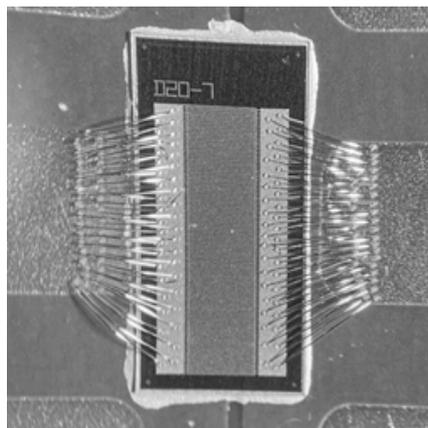
**Fig. 1.** Cross-section of the base cell of multi-finger low-voltage power Schottky diode

Конструкция базовой ячейки силового GaN диода Шоттки имела анод длиной  $L_A = 11$  мкм, изготовленный на основе многослойной металлической композиции Pt/Ti/Au (30/20/400 нм), с глубиной подающего заглабления (рецесса)  $h_{recess} = 40$  нм. Над анодом располагались два полевых электрода, предназначенные для плавного распределения напряженности электрического поля между анодом и катодом диода и увеличения его пробивного напряжения [12]. Первый полевой электрод, являвшийся частью анода, имел размер  $L_{FP1} = 2$  мкм. Второй полевой электрод, выполненный в металлизации первого уровня M1 на основе многослойной металлической композиции Ti/Pt/Au (25/25/400 нм), имел размер  $L_{FP2} = 2$  мкм. Катод длиной  $L_C = 13$  мкм был выполнен на основе многослойной металлической композиции Ti/Al/Ni/Au (20/120/55/45 нм). Расстояние между анодом и катодом  $L_{AC}$  составляло 7 мкм. Металлизация второго уровня M2 выполнялась на основе многослойной металлической композиции Ti/Pt/Au (25/25/400 нм).

С использованием базовой ячейки, путем ее многократной трансляции, был раз-

работан экспериментальный образец силового GaN диода Шоттки, который имел 200 пальцев шириной 1 мм и суммарную ширину  $W_D = 200$  мм. Кристалл диода имел размеры  $5 \times 2,6$  мм. Всего было изготовлено 25 экспериментальных образцов кристаллов силовых GaN диодов Шоттки.

*Методика измерения электрических параметров силовых GaN диодов Шоттки* заключалась в импульсном измерении их вольтамперной характеристики (ВАХ). Для проведения измерений кристаллы силовых GaN диодов монтировались на специализированную печатную плату, имеющую контактные площадки с финишным покрытием типа иммерсионное никель-палладий-золото (ENEPIG). Монтаж кристаллов осуществлялся на теплопроводящий клеевой состав. Электрическое соединение контактных площадок кристалла с контактными площадками печатной платы осуществлялось с помощью золотых проволочных соединений диаметром 25 мкм. На рис. 2 представлен внешний вид кристалла силового GaN диода Шоттки, разваренного золотой проволокой.



**Рис. 2.** Микрофотография экспериментального образца кристалла силового низковольтного диода Шоттки, разваренного золотой проволокой на печатной плате для электрических измерений

**Fig. 2.** Micrograph of an experimental sample of a low-voltage power Schottky diode die bonded with gold wire on a printed circuit board for electrical measurements

Для исключения влияния саморазогрева кристалла силового GaN диода Шоттки, возникающего при длительном протекании тока, измерение прямой ветви ВАХ осуществлялось в импульсном режиме по схеме измерений, приведенной на рис. 3, а. Измерение обратной ветви ВАХ проводилось в статическом режиме, поскольку малая выделяемая мощность (не более 0,1 Вт) исключала саморазогрев диодов. Принципиальная схема измерений обратной ветви ВАХ приведена на рис. 3, б.

Измерение импульсного тока и падения напряжения на диоде осуществлялось с помощью осциллографа Rigol MSO8204. Ток в цепи измерялся по падению напряжения на токовом шунте, образованном резисторами  $R4-R7$ . Источником импульсного тока являлись керамические конденсаторы  $C1-C5$  с суммарной емкостью 50 мкФ. Конденсаторы заряжались до нужного уровня напряжения лабораторным источником  $E1$ . Коммутация импульсного тока осуществлялась транзистором  $VT1$ , который управлялся функциональным генератором сигналов. Ток в цепи ограничивался резистором  $R2$ ; резистор  $R1$  осуществлял подтяжку к «земле». Для исключения саморазогрева силового GaN диода

Шоттки его температура контролировалась перед измерением и сразу после измерения. Контроль температуры активной области диода основывался на измерении падения напряжения на диоде при протекании через диод стабилизированного тока от источника  $E2$ , который ограничивался резистором  $R3$ . Диод  $D1$  изолировал цепи для контроля температуры от цепи источника импульсного тока. Измерения прямой ветви ВАХ производились при ширине импульса от 2 до 10 мкс; длительность импульса уменьшалась с увеличением тока. Измерения прямой ветви ВАХ производились в диапазоне падения напряжения на диоде от 0 до 2 В.

В ходе измерения обратной ветви ВАХ силового GaN диода Шоттки использовались два вольтметра. Падение напряжения на диоде рассчитывалось как разность показаний вольтметров, а ток – как отношение напряжения, измеренного вольтметром  $I$ , к эквивалентному сопротивлению, образованному резистором  $R1$  и входным сопротивлением вольтметра  $I$ .

Входная емкость диодов измерялась с помощью измерителя LCR E4980A на частоте 1 МГц при нулевом напряжении смещения.

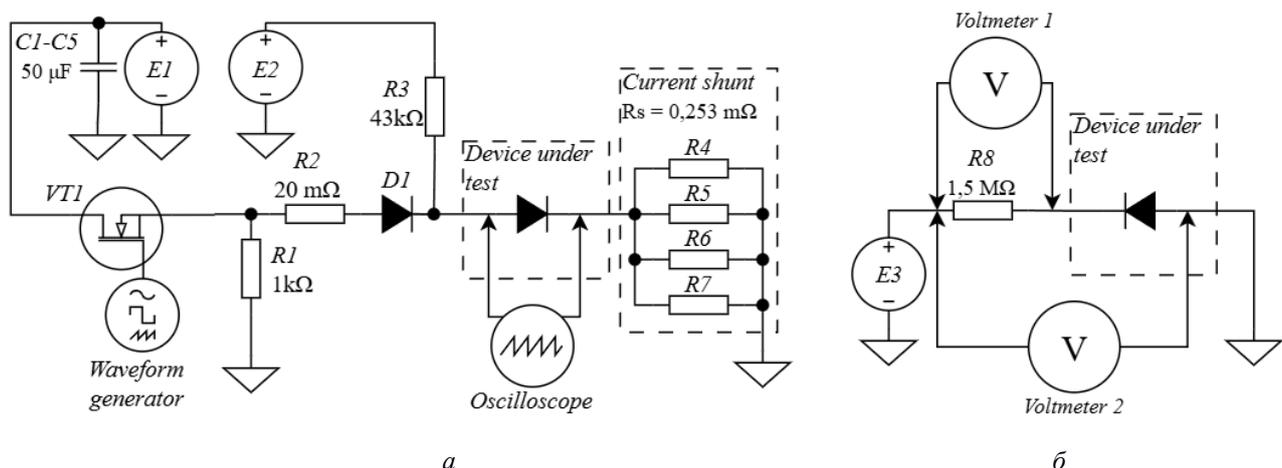


Рис. 3. Принципиальные схемы измерения вольтамперной характеристики силовых GaN диодов Шоттки: а – схема импульсных измерений прямой ветви ВАХ; б – схема измерений обратной ветви ВАХ

Fig. 3. Schematic diagrams for measuring the current-voltage characteristics of power GaN Schottky diodes: а – diagram for pulsed measurements of the forward bias region of current-voltage characteristic; б – diagram for measuring the reverse bias region of the current-voltage characteristic

Методика оценки теплового сопротивления силового GaN диода Шоттки заключалась в теоретическом расчете величины теплового сопротивления в направлении от активной области кристалла, которая находилась в слое двумерного электронного газа, расположенном на границе раздела AlGaN/GaN, к подложке SiC. Расчет проводился с использованием выражения [16]:

$$R_{th} = S \cdot \sum_i^n \frac{\sigma_i}{\lambda_i}, \quad (1)$$

где  $R_{th}$  – тепловое сопротивление;  $S$  – площадь кристалла силового GaN диода Шоттки;  $n$  – количество слоев в гетероструктуре;  $\sigma_i$  и  $\lambda_i$  – толщина и коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя;  $i$  – порядковый номер слоя в гетероструктуре. Параметры слоев гетероструктуры были приведены в табл. 1.

## 2. Результаты исследований низковольтных силовых GaN диодов Шоттки

В результате измерений двадцати пяти образцов силовых GaN диодов Шоттки

был получен набор вольтамперных характеристик, часть из которых представлена на рис. 4. Представленные характеристики ограничивают область, в которую укладывались остальные измеренные ВАХ, и отображают разброс характеристик диодов, свидетельствующий о величине воспроизводимости электрических характеристик силовых GaN диодов Шоттки по площади пластины, достигнутой с помощью использованной технологии их изготовления.

Из данных, представленных на рис. 4, *а*, видно, что для всех экспериментальных образцов силовых GaN диодов Шоттки при падении напряжения на диоде  $U_{np} = 1,7$  В был достигнут прямой ток более  $35$  А. Из данных, представленных на рис. 4, *б*, следует, что обратный ток всех образцов не превышал  $300$  мкА при обратном смещении до  $250$  В. Из измеренных прямых и обратных ветвей ВАХ были рассчитаны электрические характеристики диодов Шоттки, которые представлены в табл. 2.

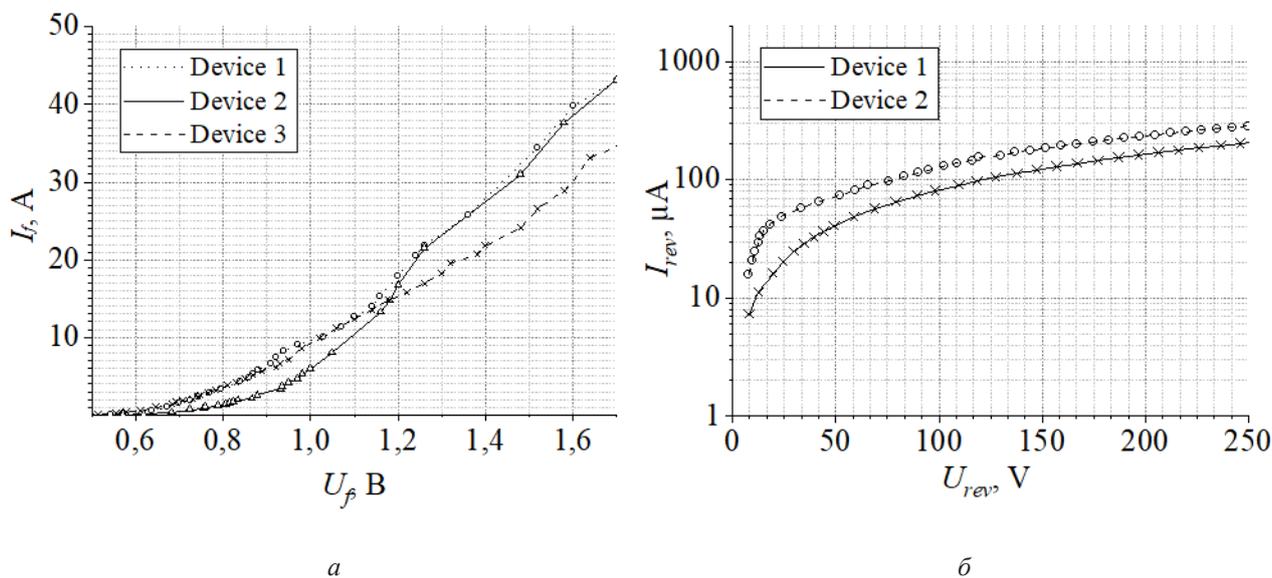


Рис. 4. Вольтамперные характеристики низковольтных силовых GaN диодов Шоттки: *а* – прямая ветвь; *б* – обратная ветвь

Fig. 4. Current-voltage characteristics of low-voltage power GaN Schottky diodes: *a* – forward-bias region; *b* – reverse-bias region

**Таблица 2.** Электрические характеристики низковольтных силовых GaN диодов Шоттки

**Table 2.** Electrical characteristics of low-voltage power GaN Schottky diodes

Электрическая характеристика / Electrical characteristic	Условия измерения / Measurement conditions	Единица измерения / Unit of measurement	Значение / Value
Ток в прямом включении $I_{пр}$ / Forward current, $I_F$	При прямом падении напряжения 1,7 В / At forward voltage drop of 1,7 V	А	35–42
Ток в обратном включении, $I_{обр}$ / reverse current, $I_R$	При обратном смещении 250 В / At reverse voltage of 250 V	мкА / μA	200–300
Пороговое напряжение открытия, $U_{пор}$ / threshold voltage, $V_{th}$	По уровню прямого тока 200 мА / At forward current of 200 mA	В / V	0,55–0,65
Прямое падение напряжения на диоде, $U_{пр}$ / Forward voltage drop, $V_F$	При прямом токе 20 А / At forward current of 20 A	В / V	1,25–1,35
Максимальное обратное напряжение, $U_{обр}^{max}$ / Maximum reverse voltage, $V_R^{max}$	По уровню обратного тока 2 мА / At reverse current 2mA	В / V	>250
Входная емкость диода, $C_{вх}$ / Input capacitance, $C_{in}$	На частоте 1 МГц, с нулевым смещением / At 1 MHz AC with 0 V bias	пФ / pF	398–623

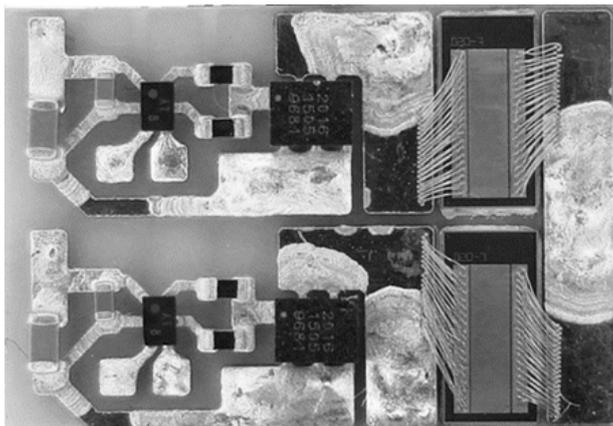
С использованием выражения 1 и значений теплопроводности каждого слоя гетероструктуры (представлены в табл. 1) было рассчитано тепловое сопротивление между активной областью диода (граница раздела слоев AlGaIn/GaN) и подложкой ( $R_{th}^{j-c}$ ). Оно составило 0,1 К/Вт, что в 2,5 раза меньше,

чем при использовании кремниевой подложки аналогичной толщины. Для качественной оценки разработанного силового GaN диода Шоттки его достигнутые параметры были сравнены с серийно-выпускаемым аналогом на основе кремния. Результаты сравнения приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Сравнение параметров низковольтного силового GaN диода Шоттки с серийно выпускаемым кремниевым аналогом MBR20200

**Table 3.** Parameters of a low-voltage power GaN Schottky diode compared to the commercially available silicon counterpart MBR20200

Электрическая характеристика / Electrical characteristic	Значение для GaN / original GaN diode value	Примечания / Notes	Значение для MBR20200 / MBR20200 value
$I_{обр}$ , мкА / $I_R$ , μA	150	При обратном смещении 200 В / At reverse voltage of 200 V	1000
$U_{пор}$ , В / $V_{th}$ , V	0,55	По уровню прямого тока 200 мА / At forward current of 200 mA	–
$U_{пр}$ , В / $V_F$ , V	1,25	При прямом токе 20 А / At forward current 20 A	0,95
$U_{обр}$ , В / $V_R$ , V	–250	Максимальное рабочее напряжение / Maximum operation voltage	–200
C, пФ / C, pF	398	На частоте 1 МГц, с нулевым смещением / At 1 MHz AC with 0 V bias	400
$R_{th}^{j-c}$ , К/Вт / $R_{th}^{j-c}$ , K/W	0,1	Тепловое сопротивление активная область диода – корпус / Junction-to-case thermal resistance	2



**Рис. 5.** Микрофотография силовой GaN микросборки на основе керамической AlN платы с двухсторонней медной металлизацией и переходными металлизированными отверстиями, силовых GaN транзисторов и разработанных диодов Шоттки

**Fig. 5.** Micrograph of GaN multichip power micromodule based on a ceramic AlN board with double-sided copper metallization and metal vias, with power GaN transistors, and the developed Schottky diodes

Из табл. 3 видно, что серийно выпускаемый кремниевый аналог обладает более низким значением прямого падения напряжения при протекании максимального тока, более низким максимальным рабочим напряжением, а также на порядок более высоким током в обратном включении, что, вероятно, обусловлено пониженной величиной высоты барьера Шоттки. Пониженное значение  $U_{пр}$  при прямом токе 20 А позволяет достичь меньшей рассеиваемой мощности диода в прямом включении. Емкость силового GaN диода Шоттки сравнима с емкостью серийно выпускаемого диода Шоттки и находится на уровне 400 пФ. За счет использования высокотеплопроводящей подложки SiC, разработанный силовой GaN диод Шоттки имеет более низкое тепловое сопротивление между активной областью диода и корпусом.

*Применение низковольтных силовых GaN диодов Шоттки.* Кристаллы низковольтных силовых GaN диодов Шоттки были использованы для шунтирования силовых GaN транзисторов в составе силовой микросборки синхронного выпрямителя. Силовая GaN микросборка была выполнена на основе керамической платы с переходными металлизированными отверстиями, силовыми GaN транзисторами, затворными драйверами и пассивными чип-компонентами. Ее концеп-

ция была описана в работах [17, 18]. Внешний вид силовой GaN микросборки синхронного выпрямителя представлен на рис. 5.

Микросборка синхронного выпрямителя предназначалась для использования во вторичной части высокоплотных высокочастотных одноконтурных DC-DC преобразователей [19, 20].

### Выводы

В результате выполнения работы разработан и экспериментально исследован низковольтный силовой GaN диод Шоттки на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN, сформированной на высокотеплопроводной подложке SiC. Предложена и реализована конструкция базовой ячейки диода с системой полевых электродов. Определены электрические характеристики разработанных диодов. Проведено сравнение электрических характеристик с серийно выпускаемым кремниевым аналогом. Показано преимущество использования подложек SiC с точки зрения тепловых характеристик. Практическая значимость работы подтверждена успешной интеграцией разработанных кристаллов диодов в состав силовой GaN микросборки синхронного выпрямителя. Микросборка предназначена для применения во вторичной части высокоплотных высокочастотных DC-DC

преобразователей, что открывает перспективы создания компактных и эффективных систем электропитания нового поколения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rafin S.S.H., Ahmed R., Haque M.A., et al. Power electronics revolutionized: A comprehensive analysis of emerging wide and ultrawide bandgap devices // *Micromachines*. 14(11), 2045 (2023). DOI: 10.3390/mi14112045.
2. Dhameliya N. Power electronics innovations: Improving efficiency and sustainability in energy systems // *Asia Pacific Journal of Energy and environment*. 9(2), 71–80 (2022). DOI: 10.18034/apjee.v9i2.752.
3. Tsao J. Y. et al. Ultrawide-bandgap semiconductors: Research opportunities and challenges // *Advanced Electronic Materials*. 4, 1600501 (2018). DOI: 10.1002/aelm.201600501.
4. Bartenev A.I., Kagadey V.A., Koryakovtsev A.S., et al. GaN power electronics as a driver of energy efficiency growth in electrical energy converters // *Tekhnologii Bezopasnosti Zhiznedeyatelnosti*. 1, 91–100 (2023). (In Russian) [Бартенев А.И., Кагадей В.А., Коряковцев А.С. и др. Силовая GaN-электроника как фактор роста энергоэффективности преобразователей электрической энергии // *Технологии безопасности жизнедеятельности*. 1, 91–100 (2023)]. DOI: 10.17223/7783494/1/12.
5. Athwer A., Darwish A. A review on modular converter topologies based on WBG semiconductor devices in wind energy conversion systems // *Energies*. 16(14), 5324 (2023). DOI: 10.3390/en16145324.
6. Roccaforte F., Fiorenza P., Greco G., et al. Challenges for energy efficient wide band gap semiconductor power devices // *Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science*. 211(9), 2063–2071 (2014). DOI: 10.1002/pssa.201300558.
7. Rafin S.M.S.H., Ahmed R., Mohammed O.A. Wide band gap semiconductor devices for power electronic converters. In: 2023 Fourth International Symposium on 3D Power Electronics Integration and Manufacturing (3D-PEIM). IEEE, 2023. P. 1–8. DOI: 10.1109/3D-PEIM55914.2023.10052586.
8. Bykhovski A., Gelmont B., Shur M. The influence of the strain-induced electric field on the charge distribution in GaN-AlN-GaN structure // *Journal of Applied Physics*. 74(11), 6734–6739 (1993). DOI: 10.1063/1.355070.
9. Asbeck P. M., et al. Piezoelectric charge densities in AlGaIn/GaN HFETs // *Electronics Letters*. 33(14), 1230–1231 (1997). DOI: 10.1049/el:19970843.
10. Buffolo M. et al. Review and outlook on GaN and SiC power devices: Industrial state-of-the-art, applications, and perspectives. // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 71(3), 1344–1355 (2024). DOI: 10.1109/TED.2023.3346369.
11. Liu Y.F., Tan D. A discussion on ultrahigh efficiency and ultrahigh power density DC-DC converter technologies. // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 11(3), 2457–2468 (2023). DOI: 10.1109/JESTPE.2023.3239516.
12. Shao Y. et al. Research progress and prospect of GaN Schottky diodes // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 57(9), 093001 (2023). DOI: 10.1088/1361-6463/ad0c7a.
13. Soni A., Amogh K.M., Shrivastava M. Design guidelines and performance tradeoffs in recessed AlGaIn/GaN Schottky barrier diodes // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 67(11), 4834–4841 (2020). DOI: 10.1109/TED.2020.3024354.
14. Kolawole M.I. Advanced wide-bandgap semiconductor devices for high-power applications: GaN, SiC, and diamond-based electronics for extreme environments. // *International Journal of Engineering Technology Research and Management*. 9(2), 335 (2025). DOI: 10.5281/zenodo.14938163.
15. Polyntsev E., Erofeev E., Yunusov I. The Influence of Design on Electrical Performance of AlGaIn/GaN Lateral Schottky Barrier Diodes for Energy-Efficient Power Applications // *Electronics*, 10(22), 2802 (2021). DOI: 10.3390/electronics10222802.
16. Popeskul A.N. *Calorifics: Methodological rationale*. Moscow: Nauka, 2016. 132 p. (In Russian) [Попескул А.Н. *Теплотехника: Методическое пособие*. М.: Наука, 2016. 132 с.]
17. Polyntsev E.S. et al. Design and optimization of 100 V GaN multi-chip power micromodule based on AlN DBC substrate // 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 1180–1184 (2024). DOI: 10.1109/EDM61683.2024.10614962.
18. Kodorova I.Y., Polyntsev E.S., Kagadey V.A. Thermal Analysis of Packaging Solution for GaN Multi-chip Power Micromodule. In: 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). IEEE, 2024. P. 1230–1233. DOI: 10.1109/EDM61683.2024.10615202.
19. Polyntsev E. et al. High frequency 1 MHz 72 W forward converter with active clamp and synchronous rectifier based on GaN multichip power micromodules. In: 2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). IEEE, 2025. P. 790–795. DOI: 10.1109/EDM65517.2025.11096879.
20. Li H. et al. Digital synchronous rectifier control using extended harmonics impedance model for high-frequency GaN-based LLC converters // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 71(10), 12312–12322 (2024). DOI: 10.1109/TIE.2024.3357840.