

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КИБЕР- И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ENSURING CYBER AND INFORMATION SECURITY

Научная статья

УДК 621.316

doi: 10.17223/7783494/1/12

Силовая GaN-электроника как фактор роста энергоэффективности преобразователей электрической энергии

Бартенев Александр Иванович¹, Кагадей Валерий Алексеевич², Коряковцев Артём Сергеевич³,
Полынцев Егор Сергеевич⁴, Помазанов Алексей Владимирович⁵,
Проказина Ирина Юрьевна⁶, Шеерман Федор Иванович⁷

^{1, 3, 5, 7} Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

^{2, 4, 6} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ san4ubas1@gmail.com

² vak@mail.tsu.ru

³ artem.s.koriakovtsev@tusur.ru

⁴ e.polyntsev@gmail.com

⁵ aleksei.v.pomazanov@tusur.ru

⁶ irina_tusur@mail.ru

⁷ fish@tusur.ru

Аннотация. Показано, что переход от силовой Si-электроники к силовой GaN-электронике является действенным методом, обеспечивающим рост энергоэффективности преобразователей электрической энергии. Проведен сравнительный анализ эффективности оборудования силовой электроники на основе Si и GaN, а также показаны текущее состояние и тренды развития дискретных силовых транзисторов и силовых интегральных схем (ИС) на основе GaN. Показано, что переход к GaN ИС является одним из базовых трендов развития силовой микроэлектроники. Представлены результаты разработки силовых GaN-интегральных схем на основе гетероструктур GaN/SOI с напряжением 650 и 200 В.

Ключевые слова: энергоэффективность, силовая GaN-электроника, монолитная интеграция, GaN/SOI, полумост

Благодарности: работа была выполнена при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере», договор № 4451П/64870 от 24.12.2020 г. и 41ГУРЭС14/72791 от 26 декабря 2021 г. Авторы выражают благодарность Центру коллективного проектирования ЭКБ и РЭА НИ МИЭТ за предоставление доступа к лицензионному САПР и вычислительной инфраструктуре. Авторы также выражают благодарность Миллеру Андрею Ивановичу за консультации и поддержку.

Для цитирования: Бартенев А.И., Кагадей В.А., Коряковцев А.С., Полынцев Е.С., Помазанов А.В., Проказина И.Ю., Шеерман Ф.И. Силовая GaN-электроника как фактор роста энергоэффективности преобразователей электрической энергии // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 91–100. doi: 10.17223/7783494/1/12

Original article

doi: 10.17223/7783494/1/12

GaN power electronics as a driver of energy efficiency growth in electrical energy converters

Aleksandr I. Bartenev¹, Valery A. Kagadey², Artyom S. Koryakovtsev³, Egor S. Polyntsev⁴,
Aleksei V. Pomazanov⁵, Irina Y. Prokazina⁶, Feodor I. Sheyerman⁷

^{1, 3, 5, 7} Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

^{2, 4, 6} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ san4ubas1@gmail.com

² vak@mail.tsu.ru

³ artem.s.koriakovtsev@tusur.ru

⁴ e.polyntsev@gmail.com

⁵ aleksei.v.pomazanov@tusur.ru

⁶ irina_tusur@mail.ru

⁷ fish@tusur.ru

Abstract. Exponential humanity growth forms new global challenges, such as efficient energy consumption. Transition from Si-based to GaN-based power electronics devices and systems was proposed as a way to increase energy efficiency. The profit from the transition to GaN-based devices was demonstrated as an increase in energy converters efficiency and reduction of mass and weight parameters on a system level. The review of the current state of the GaN commercial devices and systems was carried out. The discrete GaN/Si based depleted mode and enhanced mode HEMT are commercially available and widely used today. Vertical GaN/GaN transistors are not commercially available yet, but expected to enable extremely high breakdown voltages and high currents. The development and mass production of GaN ICs is one of the basic trends in the development of power GaN microelectronics. Nowadays power GaN IC are not widespread on a commercial market, due to early stage of technology development, as well as the lack of a number of necessary IC elements, such as a complementary pair of digital GaN transistors with *p*- and *n*-type channels and high-current GaN diodes. The results of development of four various power GaN integrated circuit based on the GaN/SOI technology platform are presented in the paper. A half-bridge IC with integrated driver and power e-mode HEMT for 650 V applications, a half-bridge gate driver IC and a single channel gate driver IC for 650V e-mode n-GaN HEMT were developed for high voltage operation basing on IMEC GANIC650SOI design kit. Basic electrical parameters of high voltage ICs and layout design are presented in the paper. The developed solutions were adopted for low-voltage operations basing on IMEC GANIC200SOI design kit. As a result, 200V half-bridge IC with on-chip drivers and power e-HEMT was developed. The use of GaN/SOI technological platform seems to be one of the effective methods for suppressing sidegating and backgating effects and obtaining ICs with improved characteristics.

Keywords: energy efficiency, GaN power electronics, monolithic integration, GaN/SOI, half-bridge

Acknowledgments: The work was carried out with the financial support of the Federal State Budgetary Institution “Foundation for the Promotion of the Development of Small Forms of Enterprises in the Scientific and Technical Sphere”, Agreement No. 445ГП/64870 dated December 24, 2020 and Agreement No. 41ГУПЭС/72791 dated December 26, 2021. The authors express their appreciation to Center for Collective Design of Electronic Component Base and Radioelectronics Equipment of National Research University of Electronic Technology for providing access to the licensed CAD and computing infrastructure. The authors express their gratitude to Andrey I. Miller.

For citation: Bartenev, A.I., Kagadey, V.A., Koryakovtsev, A.S., Polyntsev, E.S., Pomazanov, A.V., Prokazina, I.Y. & Sheyerman, F.I. (2023) GaN Power Electronics as a Driver of Energy Efficiency Growth in Electrical Energy Converters. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 91–100. doi: 10.17223/7783494/1/12 (In Russian).

Введение

Известно, что в мировом энергетическом балансе доля электричества будет быстро расти в течение следующих 30 лет [1]. Планируется, что к 2050 г. в Европе электричество станет главным источником энергии, увеличив свою долю с 19 до 49% [2], а экономия электроэнергии станет одним из важных методов, обеспечивающих рост эффективности глобальной энергосистемы. В Российской Федерации одним из стратегических направлений приоритетного технологического развития также являются энергоэффективность и энергосбережение [3]. Все это свидетельствует о необходимости разработки и внедрения новых технологий, обеспечивающих дальнейший рост коэффициента полезного действия (КПД) оборудования генерации и потребления электроэнергии.

Эффективность преобразования электрической энергии во многом определяется типом и электрическими характеристиками электронной компонентной базы (ЭКБ), используемой в преобразователях энергии и вторичных источниках электропитания (ВИП). Активный прогресс в силовой ЭКБ на основе кремния (Si), который наблюдался в течение второй половины XX в., позволил к нулевым годам XXI в. достичь теоретического предела в характеристиках силовой ЭКБ на основе Si. В результате этого замедлился прирост КПД преобразователей и ВИП. Стало

очевидно, что дальнейший рост энергетической эффективности преобразования электрической энергии возможен только при переходе на принципиально новую ЭКБ.

В качестве перспективной ЭКБ сегодня рассматриваются полупроводниковые приборы на основе следующих широкозонных полупроводников: карбид кремния (SiC), нитрид галлия (GaN), оксид галлия (Ga₂O₃) и алмаз.

В настоящее время, хотя и в ограниченной номенклатуре, но уже стала коммерчески доступной ЭКБ на основе SiC и GaN. Согласно своим электрическим характеристикам, силовые диоды и транзисторы на основе SiC наиболее эффективны для применения в мощных (более 10 кВт) преобразователях и ВИП с рабочим напряжением более 1 200 В. Полупроводниковые приборы на основе GaN используются в оборудовании средней и малой мощности (менее 10 кВт) с напряжением до 1 200 В. Силовые транзисторы и диоды на основе Ga₂O₃ и алмаза пока находятся в стадии разработки и на рынке практически не представлены.

В настоящей работе кратко рассмотрены актуальные вопросы и тренды развития силовой ЭКБ на основе GaN, предназначенной для создания нового поколения энергопреобразующего оборудования с повышенным КПД, а также приведены примеры собственной разработки силовых GaN-интегральных схем.

Энергоэффективность оборудования силовой электроники на основе Si и GaN ЭКБ: сравнительный анализ

Перспективность применения дискретных полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС) на основе GaN в силовой электронике связана с лучшими по сравнению с кремнием электрофизическими параметрами материала: большей шириной запрещенной зоны, повышенными электрической прочностью, скоростью дрейфа электронов в режиме насыщения, а также потенциально высокой рабочей температурой и радиационной стойкостью [4–6]. Замена Si на GaN приводит к тому, что силовые транзисторы на основе AlGaIn/GaN гетероструктур обладают большей плотностью тока, повышенной

скоростью переключения и сниженным сопротивлением в открытом состоянии [7]. В свою очередь, это позволяет существенно снизить все виды потерь в преобразователях энергии, а также уменьшить массогабаритные характеристики и осуществлять работу устройств в более экстремальных условиях эксплуатации. Если сравнивать универсальный показатель качества по Балиге (Baliga's figure of merit [8]), который определяет резистивные потери в канале полевого транзистора, то GaN-транзисторы демонстрируют показатель, в 34 раза превышающий показатель для Si и в три раза превышающий показатель для SiC [9]. Основные достоинства применения GaN-приборов и устройств в силовой электронике представлены на рис. 1.



Рис. 1. Преимущества GaN-приборов перед кремниевыми аналогами на электрофизическом, приборном и системном уровнях

Fig. 1. Advantages of GaN devices over silicon counterparts at the electrophysical, device and system levels

В табл. 1 приведено сравнение эффективности DC-DC, AC-DC и DC-AC преобразователей энергии, построенных на традиционной кремниевой ЭКБ и на ЭКБ на основе широкозонных полупроводниковых материалов (GaN и SiC). Видно, что для всех видов преобразователей переход к ЭКБ на основе широкозонных полупроводниковых материалов позволяет поднять КПД энергопреобразующего оборудования.

Таблица 1

КПД разных типов преобразователей, построенных с использованием Si ЭКБ, а также ЭКБ на основе широкозонных полупроводниковых материалов

Тип преобразователя	DC-DC	AC-DC	DC-AC
КПД преобразователя на основе Si ЭКБ, %	88	85	96
КПД преобразователя на основе GaN, SiC ЭКБ, %	95	90	99

Силовые GaN-транзисторы: состояние дел

Исторически первыми коммерчески доступными GaN-транзисторами стали нормально открытые (depletion mode, D-mode) планарные транзисторы с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistors, HEMTs), изготовленные на гетеро-

структурах GaN/Si. С точки зрения устройств силовой электроники они требовали применения дополнительного кремниевого транзистора в каскодном включении. Позднее появились так называемые каскодные транзисторы, сочетающие в одном корпусе нормально открытый силовой GaN/Si транзистор и кремниевый полевой транзистор.

Вслед за ними на рынке появились нормально закрытые (enhanced mode, E-mode) GaN/Si HEMTs. Они не требовали дополнительного Si-транзистора и обеспечивали закрытое состояние транзистора без подачи напряжения на затвор. Эти преимущества мотивировали начало процесса постепенного вытеснения с рынка D-mode HEMTs. Сегодня серийно производятся E-mode HEMTs с рабочим напряжением до 1 200 В [10] и током до 150 А [11].

На рис. 2 представлены теоретические зависимости (линии) и экспериментальные данные (закрашенные области) для удельного сопротивления открытого канала транзистора от напряжения пробоя для силовых транзисторов на основе Si, SiC и GaN, полученные в рамках лабораторных исследований. Показатель качества транзисторов растет от левого верхнего к правому нижнему углу. Видно, что при-

боры на основе Si достигли своих предельных значений, а приборы на основе GaN не только имеют наилучшие параметры, но и располагают потенциалом для дальнейшего совершенствования. Транзисторы на основе SiC занимают промежуточное положение между Si- и GaN-приборами.

В качестве приборов, перспективных для мощных и сверхмощных применений, сегодня рассматриваются вертикальные силовые GaN/GaN-транзисторы, которые пока находятся в стадии разработки [12]. Преимуществом вертикальных GaN/GaN-транзисторов по сравнению с планарными GaN/Si-транзисторами является высокое пробивное напряжение

(более 1 700 В) и большие плотности токов (до 1 000 А/см²) [12]. Вертикальные GaN-транзисторы, использующие эпитаксиальные структуры на основе монокристаллических подложек GaN, должны со временем позволить GaN-приборам приблизиться к теоретическому пределу своих электрических характеристик (рис. 2). Отсутствие высококачественных и недорогих GaN-подложек пока ограничивает перспективы массового промышленного производства вертикальных GaN-транзисторов. На рис. 3 представлены базовые конструкции планарного и вертикального GaN-транзисторов, а также направления протекания токов в них.

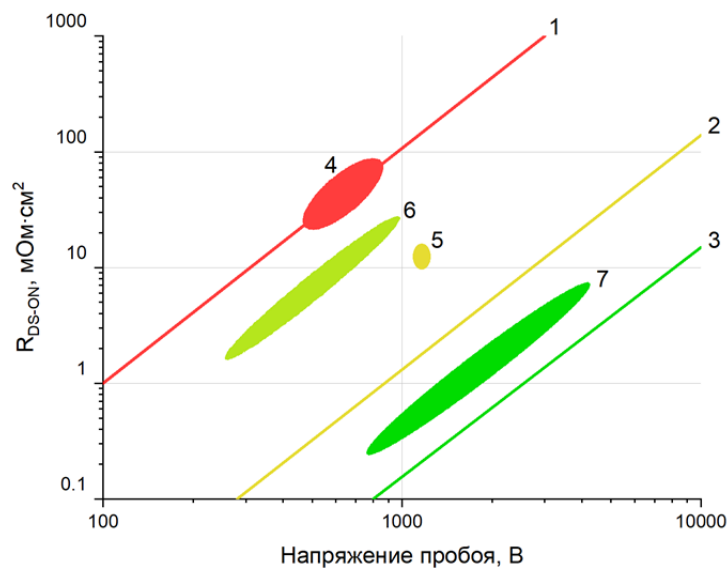


Рис. 2. Теоретические пределы для Si (1), SiC (2), GaN (3) силовых транзисторов, а также достигнутые экспериментальные значения параметров транзисторов на основе Si (4), SiC (5), GaN/Si (6), GaN/GaN (7)

Fig. 2. Theoretical limits for Si (1), SiC (2), GaN (3) power transistors and achieved experimental parameters of transistors based on Si (4), SiC (5), GaN/Si (6) and GaN/GaN (7)

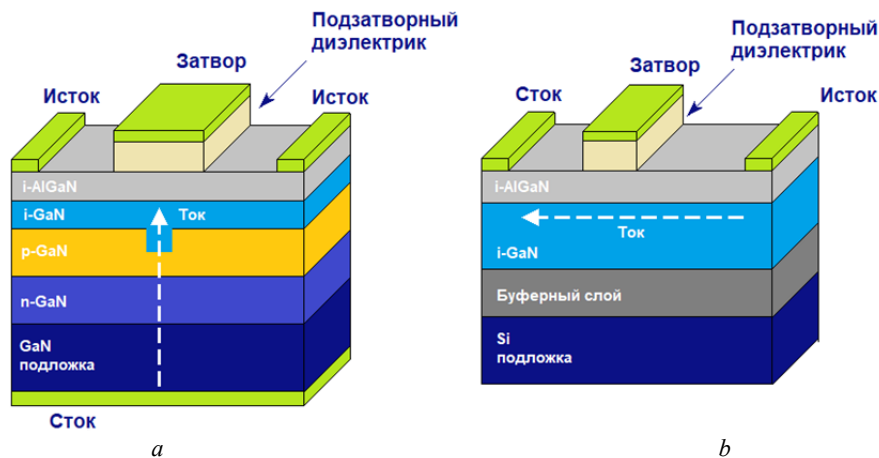


Рис. 3. Базовые конструкции GaN-транзисторов: *a* – вертикального на основе гетероструктуры GaN/GaN; *b* – планарного на основе гетероструктуры GaN/Si

Fig. 3. Conventional discrete GaN transistors structures: *a* – vertical GaN/GaN; *b* – lateral GaN/Si

В настоящее время проводятся активные исследования, направленные на получение планарных GaN/Si-транзисторов с каналом *p*-типа проводимости [14–16]. Разработка такого транзистора позволит создать комплементарную пару и использовать её в цифровых блоках GaN-интегральных схем драйверов управления силовыми GaN-транзисторами.

Силовые GaN-интегральные схемы: состояние дел

Разработка и освоение в массовом производстве GaN ИС является одним из базовых трендов развития силовой GaN-микроэлектроники. Это обусловлено тем фактом, что интеграция цифровой схемы управления, драйвера и силовых транзисторов на одном кристалле за счет миниатюризации межсоединений позволяет снизить паразитные емкости и индуктивности (уменьшить потери), что позволяет поднять КПД и рабочую частоту преобразования и, как следствие, уменьшить массогабаритные характеристики энергопреобразующего оборудования [17]. Кроме этого, интеграция всех элементов на одном кристалле позволяет увеличить надежность и снизить себестоимость финальных изделий.

В настоящее время на рынке представлено весьма ограниченное число типоминималов силовых GaN-ИС. Это обусловлено ранним этапом развития технологии, а также отсутствием ряда необходимых активных элементов ИС. К таковым относятся: комплементарная пара цифровых GaN-транзисторов с каналами *p*- и *n*-типа проводимости, силовоточные GaN-диоды и др. Одно из базовых конструкторско-технологических ограничений связано с необходимостью подавления высокого уровня взаимного влияния силовоточных сигналов выходных транзисторов друг на друга, а также на другие слаботочные сигналы, протекающие в ИС, т.е. с необходимостью подавления *sidegating*- и *backgating*-эффектов [18].

На сегодняшний день на рынке представлены гибридные интегральные схемы, объединяющие в одном корпусе кристалл драйвера управления на основе Si и кристаллы выходных силовых GaN-транзисторов. Примером такой схемы является полумост с высокой удельной мощностью MASTERGAN1 от компании STMicroelectronics [19]. Недостатком гибридной сборки является её повышенная (относительно монолитного исполнения) паразитная индуктивность, которая увеличивает коммутационные потери и снижает КПД преобразователя [20].

На рынке также доступны интегральные схемы в монолитном исполнении, это, например, LMG5200 (Texas Instruments) и EPC2152 (EPC), рассчитанные на рабочее напряжение 80 В [21–22]. Такое низкое рабочее напряжение ограничено взаимным влиянием

сигналов выходных ключевых транзисторов друг на друга. В начале 2022 г. было представлено пилотное решение от бельгийской компании MinDCet [23] – это GaN-ИС затворного драйвера MDC901, рассчитанная на напряжение до 200 В и обеспечивающая скорость нарастания напряжения до 100 В/нс.

Большинство ИС сегодня изготавливается на основе гетероструктур GaN/Si. Университет Фердинанда-Брауна (Ferdinand-Braun-Institut, Германия) использует гетероструктуры GaN/SiC, а Межуниверситетский микроэлектронный центр (IMEC, Бельгия) – гетероструктуры GaN-на кремнии-на диэлектрике (GaN/SOI). С точки зрения подавления *sidegating*- и *backgating*-эффектов технология GaN/SOI от IMEC является наиболее совершенной, так как она использует для создания межэлементной изоляции тонкий слой SiO₂, находящийся под отсеченным слоем Si, а также глубокие изолированные транчи, достигающие слоя SiO₂. Все это позволяет практически идеально изолировать элементы ИС друг на друга.

Интегральные схемы на основе гетероструктур GaN/SOI: результаты разработки

Авторами были разработаны силовые GaN-интегральные схемы, основанные на технологии GaN/SOI, в частности, это:

- высоковольтная ИС полумоста с драйвером управления и силовыми нормально закрытыми транзисторами с рабочим напряжением до 650 В;
- высоковольтный драйвер управления силовым полумостом, состоящим из пары силовых нормально закрытых GaN-транзисторов с рабочим напряжением до 650 В;
- высоковольтный одноканальный драйвер управления силовым нормально закрытым GaN-транзистором с рабочим напряжением до 650 В [24];
- низковольтная ИС полумоста с драйвером управления и силовыми нормально закрытыми транзисторами с рабочим напряжением до 200 В.

Проектирование всех ИС выполнялось в САПР Cadence Virtuoso при использовании средств физической верификации nmLVS, nmDRC от Calibre. С использованием дизайн-кита GANIC650SOI от IMEC (технологический процесс GaN650V) была разработана собственная библиотека высоковольтных сложных функциональных (СФ) блоков, на основе которой были спроектированы и реализованы топологии ИС с рабочим напряжением до 650 В.

Библиотека высоковольтных СФ-блоков включала в себя набор базовых логических элементов, построенных на основе резисторно-транзисторной логики: инвертор, 2И, 2ИЛИ, триггер Шмита, а также компаратор. С использованием базовых логических

элементов разработаны следующие СФ-блоки: блок логики, блоки защиты от перегрева (БЗП), блок защиты от низкого напряжения питания (БЗННП), блок управления временем защитного интервала (БУВЗИ), блок сдвига уровня сигнала (БСУС, level-shifter), драйверы нижнего и верхнего уровня сигнала.

С использованием данных СФ-блоков были построены три различные ИС. Типовая функциональная схема ИС полумоста, представленная на рис. 4, состоит из входной логической части, драйверов верхнего и нижнего уровней, а также силового полумоста. Входная часть задаёт режим работы ИС, обеспечивает отключение драйвера при перегреве или падении напряжения питания, задаёт защитный временной интервал, а также исключает ложные переключения

драйвера. Драйверы ИС преобразуют управляющие слаботочные сигналы в сильноточные сигналы, управляющие силовым полумостом. Силовой полумост состоит из пары высоковольтных силовых транзисторов, к которым подключается нагрузка.

Высоковольтная ИС полумоста обеспечивает выходной ток до 9 А, рабочее напряжение до 650 В и частоту переключений более 1 МГц. В табл. 2 приведены электрические характеристики высоковольтной ИС полумоста с драйвером управления, полученные в результате моделирования в САПР. Внешний вид топологии ИС полумоста приведен на рис. 5. Кристалл имеет 18 контактных площадок, расположенных по периметру кристалла. Размер ИС составляет $2,7 \times 5,4 \text{ мм}^2$.

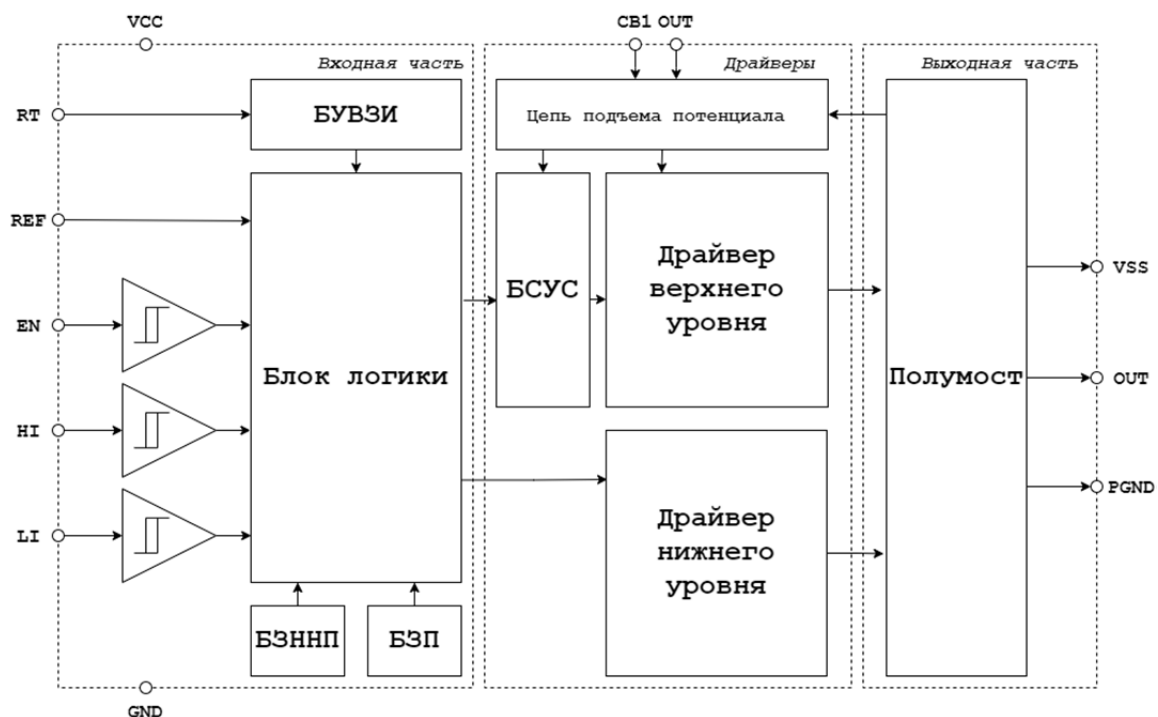


Рис. 4. Функциональная схема высоковольтного GaN ИС полумоста

Fig. 4. High-voltage half-bridge GaN IC functional block diagram

Таблица 2

Электрические характеристики высоковольтных GaN ИС

Характеристика	Полумост с драйвером управления	Драйвер управления полумостом	Одноканальный драйвер управления силовым транзистором
Напряжение питания логической части, В	5–7		
Выходной ток при $U_{\text{пит}} = 7 \text{ В}$, А	1,3–1,4	8–9	0,37
Время нарастания импульса*, нс	20–25	25–30	34
Время спада импульса*, нс	15–20	21–25	11
Время реакции на управляющее воздействие*, нс	40	43	45
Порог напряжения срабатывания БЗННП, В	4,2		
Максимальная рабочая температура, °С	135		

* При нагрузке $C = 1 \text{ нФ}$, $R = 1 \text{ Ом}$.

Высоковольтная ИС драйвера управления полумостом предназначена для управления двумя внешними нормально закрытыми GaN-транзисторами в составе силового модуля. Функциональная схема ИС драйвера полумоста имеет входную часть и драйверы верхнего и нижнего уровня, аналогично схеме, приведенной на рис. 4, но не имеет силового полумоста. ИС драйвера полумоста обеспечивает выходные токи 1,3–1,4 А и позволяет работать на частотах более 1 МГц, рабочее напряжение может достигать 650 В. В табл. 2 приведены электрические характеристики высоковольтной ИС драйвера управления полумостом, полученные в результате моделирования в САПР. Внешний вид топологии ИС драйвера управления полумостом приведен на рис. 5. Кри-

сталл имеет 17 контактных площадок, расположенных по периметру. Размер ИС составляет $2,7 \times 5,4 \text{ мм}^2$.

Высоковольтная ИС одноканального драйвера предназначена для управления одним силовым нормально закрытым GaN транзистором в составе силового модуля. Функциональная схема ИС одноканального драйвера имеет упрощенную входную часть и драйвер нижнего уровня аналогично схеме, приведенной на рис. 4. В качестве нагрузки используется силовой GaN-транзистор с током до 10 А. Драйвер обеспечивает работу импульсного преобразователя на частотах до 1 МГц. Электрические характеристики ИС драйвера представлены в табл. 2. Кристалл одноканального драйвера имеет размеры $2,8 \times 2,8 \text{ мм}^2$.

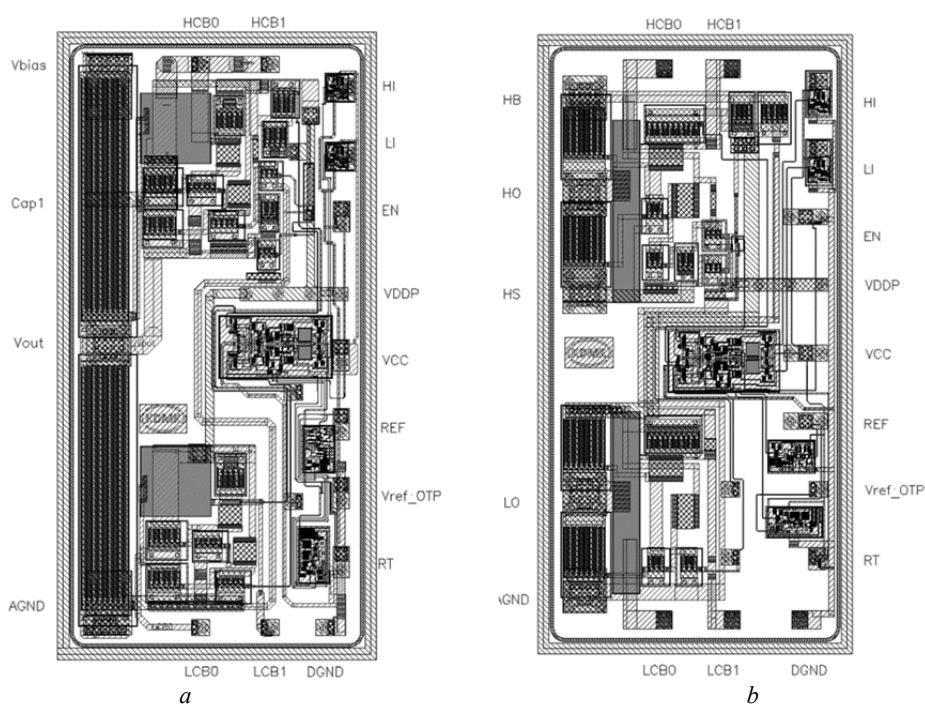


Рис. 5. Топологии: *a* – высоковольтной ИС полумоста; *b* – высоковольтной ИС драйвера управления полумостом

Fig. 5. Integrated circuit layouts: *a* – high-voltage half-bridge IC; *b* – high-voltage half-bridge driver IC

Разработанная библиотека высоковольтных СФ-блоков была адаптирована под низковольтное применение с использованием дизайн-кита GANIC200SOI (технологический процесс GaN200V). На основе библиотеки низковольтных СФ-блоков была спроектирована ИС низковольтного полумоста с драйвером и силовыми нормально закрытыми транзисторами. Функциональная схема низковольтного полумоста аналогична схеме, приведенной на рис. 4. Разработанная ИС полумоста обеспечивает выходной ток до 10 А, рабочее напряжение до 200 В, частоту коммутации до 1 МГц.

Внешний вид разработанной топологии ИС приведен на рис. 6. Выходные силовые транзисторы, образующие силовой полумост, располагаются в

верхней части кристалла. Для эффективного управления силовыми транзисторами, затворный драйвер располагается в непосредственной близости. Блоки логического управления располагаются между драйвером верхнего и нижнего уровня в нижней части интегральной схемы. Такое расположение позволяет уменьшить влияния силового полумоста на логическую часть ИС. Топология ИС имеет размеры $10 \times 5 \text{ мм}^2$ и 12 контактных площадок, расположенных на расстоянии 1,2 мм друг от друга.

Для оценки КПД DC-DC преобразователя, выполненного на основе разработанной ИС полумоста, с рабочим напряжением до 200 В, была построена имитационная модель понижающего преобразователя.

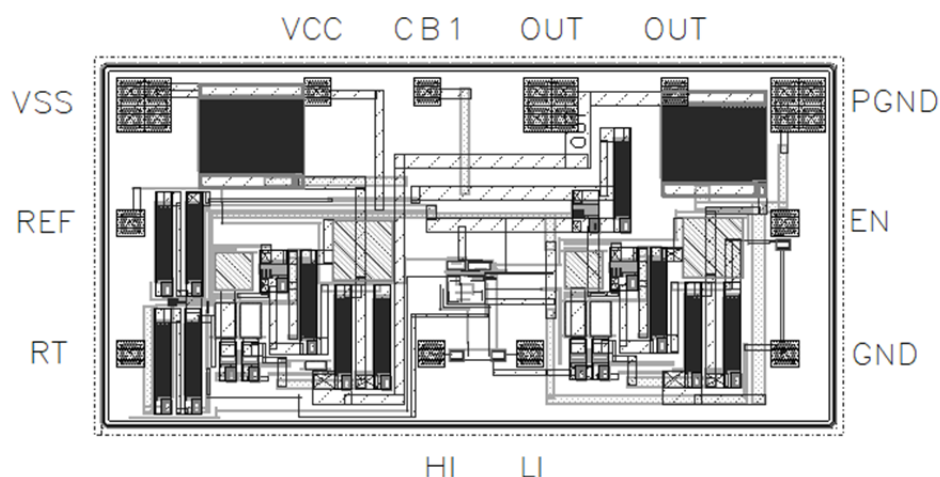


Рис. 6. Топология низковольтной ИС полумоста

Fig. 6. Low-voltage half-bridge IC layout

На разработанной модели сравнивались энергетические характеристики преобразователя с транзисторами на основе GaN (параметры получены при проектировании ИС) и Si (IRFB4020PBF [25]), аналогичные по напряжению и сопротивлению открытого канала. При входном напряжении 100 В, выходном напряжении 50 В, выходном токе 5 А и частоте переключения транзисторов 500 кГц были достигнуты показатели КПД преобразователя на основе Si около 93%, а преобразователя на основе GaN – около 96%. При увеличении частоты переключения транзисторов разрыв в КПД также будет увеличиваться. Таким образом, переход на GaN в первом приближении обеспечивает прирост КПД около 3%.

Заключение

Переход к силовой GaN-электронике является действенным методом, обеспечивающим рост энергоэффективности преобразователей электрической энергии.

Силовые GaN ИС позволяют достичь максимальных характеристик преобразователей энергии и ВИП, что делает их одними из наиболее перспективных элементов силовой GaN-микроэлектроники.

Применение гетероструктур GaN/SOI представляется одним из эффективных методов подавления sidegating- и backgating-эффектов и получения ИС с улучшенными характеристиками.

Список источников

1. Newell R., Raimi D., Aldana G. Global energy outlook 2019: the next generation of energy // Resources for the Future. 2019. V. 1. P. 8–19.
2. Gielen D., Gorini R., Wagner N., Leme R., Gutierrez L., Prakash G. et. al. Global energy transformation: a roadmap to 2050. 2019.
3. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 № 261-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации.
4. Roccaforte F., Fiorenza P., Greco G., Nigro R.L., Giannazzo F., Patti A. et. al. Challenges for energy efficient wide band gap semiconductor power devices // Physica status solidi. 2014. V. 211(9). P. 2063–2071. DOI: 10.1002/pssa.201300558
5. Flack T.J., Pushpakaran B.N., Bayne S.B. GaN technology for power electronic applications: a review // Journal of Electronic Materials. 2016. V. 45 (6). P. 2673–2682. DOI: 10.1007/s11664-016-4435-3
6. Reusch D., Strydom J., Glaser J. Improving high frequency DC-DC converter performance with monolithic half bridge GaN ICs // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2015. P. 381–387. DOI: 10.1109/ECCE.2015.7309713
7. Wu Y.F., Gritters J., Shen L., Smith R.P., Swenson B. kV-Class GaN-on-Si HEMTs Enabling 99% Efficiency Converter at 800 V and 100 kHz // IEEE Transactions on Power Electronics. 2013. V. 29(6). P. 2634–2637. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2284248
8. Baliga B.J. Power semiconductor device figure of merit for high-frequency applications // IEEE Electron Device Letters. 1989. V. 10 (10). P. 455–457. DOI: 10.1109/55.43098
9. Bi W., Kuo H.C., Ku P.C., Shen B. Handbook of GaN semiconductor materials and devices. CRC Press, 2017. 709 p.
10. GaNPower Demonstrates Industry's First 1200 V Single-Die E-Mode GaN Power Devices // GaNPower International. URL: <https://iganpower.com/ganpower-demonstrates-industrys-first-1200-v-single-die-e-mode-gan-power-devices> (дата обращения: 14.11.2022).
11. GS-065-150-1-D2 650V Enhancement Mode GaN Transistor // GaN Systems. URL: <https://gansystems.com/gan-transistors/gs-065-150-1-d2/> (дата обращения: 14.11.2022).
12. Wide bandgap devices & modules for efficient power electronics // Ferdinand-Braun-Institut. URL: https://www.fbh-berlin.de/fileadmin/downloads/frequent_2020_online_PowerElectronics.pdf (дата обращения: 14.11.2022).

13. Hilt O., Bahat Treidel E., Wolf M., Kuring C., Tetzner K., Yazdani H. et. al. Lateral and vertical power transistors in GaN and Ga₂O₃ // *IET Power Electronics*. 2019. V. 12(15). P. 3919–3927. DOI: 10.1049/iet-pel.2019.0059
14. Soleimanzadeh R., Naamoun M., Khadar R.A., Erp R., Matioli E. H-terminated polycrystalline diamond p-channel transistors on GaN-on-silicon // *IEEE Electron Device Letters*. 2020. V. 41(1). P. 119–122. DOI: 10.1109/LED.2019.2953245
15. Zheng Z., Zhang L., Song W., Chen T., Feng S., Hon Ng Y. et. al. Threshold voltage instability of enhancement-mode GaN buried p-channel MOSFETs // *IEEE Electron Device Letters*. 2021. V. 42(11). P. 1584–1587. DOI: 10.1109/LED.2021.3114776
16. Chowdhury N. p-Channel gallium nitride transistor on Si substrate. Massachusetts Institute of Technology, 2018.
17. Chen H.Y., Kao Y.Y., Zhang Z.Q., Liao C.H., Yang H.Y., Hsu M.S. et. al. A fully integrated GaN-on-silicon gate driver and GaN switch with temperature-compensated fast turn-on technique for improving reliability // 2021 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). 2021. V. 64. P. 460–462. DOI: 10.1109/ISSCC42613.2021.9365828
18. Tang G., Kwan M.H., Zhang Z., He J., Lei J., Su R.Y. et. al. High-speed, high-reliability GaN power device with integrated gate driver // 2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). 2018. P. 76–79. DOI: 10.1109/ISPSD.2018.8393606
19. MASTERGAN1 Datasheet, Rev.3, STMicroelectronics N.V., Plan-les-Ouates. Geneva, Switzerland, 2020. 27 p.
20. Li X. Reliability and Integration of GaN Power Devices and Circuits on GaN-on-SOI. Ku Leuven, 2020.
21. EPC2152 80 V, 15 A ePower™ Stage Preliminary Datasheet, Rev. 2.0, Efficient Power Conversion Corporation. El Segundo, CA, USA, 2021. 16 p.
22. LMG5200 80-V, 10-A GaN Half-Bridge Power Stage 07.09.2022. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmg5200.pdf>
23. MDC901 High Performance, 200 V Gate Driver IC // ASIC Products Mindcet URL: <https://www.mindcet.com/asic-products> (дата обращения: 14.11.2022).
24. Полынцева Е.С., Проказина И.Ю., Бартевев А.И. Одноканальный GaN затворный драйвер управления силовым нормально закрытым n-GaN-транзистором // Девятнадцатая Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов: г. Томск, 4–7 мая 2022 г. STT Publishing, 2022. С. 75.
25. IRFB4020PBF, Digital Audio MOSFET 03.03.06 URL: <https://www.infineon.com/dgdl/irfb4020pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015356158ff1e05>

References

1. Newell, R., Raimi, D. & Aldana, G. (2019) Global energy outlook 2019: the next generation of energy. *Resources for the Future*. 1. pp. 8–19.
2. Gielen, D., Gorini, R., Wagner, N., Leme, R., Gutierrez, L., Prakash, G., et. al. (2019) Global energy transformation: a roadmap to 2050.
3. Federal'nyj zakon "Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii" [Federal Law "On Energy Saving and Improving Energy Efficiency and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation"] dated 23.11.2009 № N 261-FZ. In: *Sobranie zakonodatel'stva Rossijskoj Federacii* [Collection of Legislation of the Russian Federation].
4. Roccaforte, F., Fiorenza, P., Greco, G., Nigro, R.L., Giannazzo, F., Patti, A. & Saggio, M. (2014) Challenges for energy efficient wide band gap semiconductor power devices. *Physica status solidi*. 211(9). pp. 2063–2071. DOI: 10.1002/pssa.201300558
5. Flack, T.J., Pushpakaran, B.N. & Bayne, S.B. (2016) GaN technology for power electronic applications: a review. *Journal of Electronic Materials*. 45(6). pp. 2673–2682. DOI: 10.1007/s11664-016-4435-3
6. Reusch, D., Strydom, J. & Glaser, J. (2015) Improving high frequency DC-DC converter performance with monolithic half bridge GaN ICs. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. pp. 381–387. DOI: 10.1109/ECCE.2015.7309713
7. Wu, Y.F., Gritters, J., Shen, L., Smith, R.P. & Swenson, B. (2013) kV-Class GaN-on-Si HEMTs Enabling 99% Efficiency Converter at 800 V and 100 kHz. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 29(6). pp. 2634–2637. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2284248
8. Baliga, B.J. (1989) Power semiconductor device figure of merit for high-frequency applications. *IEEE Electron Device Letters*. 10(10). pp. 455–457. DOI: 10.1109/55.43098
9. Bi, W., Kuo, H.C., Ku, P.C. & Shen, B. (2017) *Handbook of GaN semiconductor materials and devices*. CRC Press.
10. GaNPower International. (2021) *GaNPower Demonstrates Industry's First 1200 V Single-Die E-Mode GaN Power Devices*. [Online] Available from: <https://iganpower.com/ganpower-demonstrates-industrys-first-1200-v-single-die-e-mode-gan-power-devices> (Accessed: 14.11.2022).
11. GaN Systems. (n.d.) *GS-065-150-1-D2 650V Enhancement Mode GaN Transistor*. [Online] Available from: <https://gansystems.com/gan-transistors/gs-065-150-1-d2/> (Accessed: 14.11.2022).
12. Ferdinand-Braun-Institut. (2020) *Wide bandgap devices & modules for efficient power electronics*. [Online] Available from: https://www.fbh-berlin.de/fileadmin/downloads/frequent_2020_online_PowerElectronics.pdf (Accessed: 14.11.2022).
13. Hilt, O., Bahat Treidel, E., Wolf, M., Kuring, C., Tetzner, K., Yazdani, H., et. al. (2019) Lateral and vertical power transistors in GaN and Ga₂O₃. *IET Power Electronics*. 12(15). pp. 3919–3927. DOI: 10.1049/iet-pel.2019.0059
14. Soleimanzadeh, R., Naamoun, M., Khadar, R.A., Erp, R. & Matioli, E. (2020) H-terminated polycrystalline diamond p-channel transistors on GaN-on-silicon. *IEEE Electron Device Letters*. 41(1). pp. 119–122. DOI: 10.1109/LED.2019.2953245
15. Zheng, Z., Zhang, L., Song, W., Chen, T., Feng, S., Hon, Ng, Y., et. al. (2021) Threshold voltage instability of enhancement-mode GaN buried p-channel MOSFETs. *IEEE Electron Device Letters*. 42(11). pp. 1584–1587. DOI: 10.1109/LED.2021.3114776
16. Chowdhury, N. (2018) *p-Channel gallium nitride transistor on Si substrate: PHD thesis*. Massachusetts Institute of Technology.
17. Chen, H.Y., Kao, Y.Y., Zhang, Z.Q., Liao, C.H., Yang, H.Y., Hsu, M.S., et. al. (2021) 33.1 A fully integrated GaN-on-silicon gate driver and GaN switch with temperature-compensated fast turn-on technique for improving reliability. *IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*. 64. pp. 460–462.
18. Tang, G., Kwan, M.H., Zhang, Z., He, J., Lei, J., Su, R.Y., et. al. (2018) High-speed, high-reliability GaN power device with integrated gate driver. *2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*. pp. 76–79.
19. MASTERGAN1 Datasheet, Rev.3, STMicroelectronics N.V., Plan-les-Ouates (2020). Geneva, Switzerland. pp. 1–27.

20. Li, X. (2020) *Reliability and Integration of GaN Power Devices and Circuits on GaN-on-SOI: PHD thesis*. Ku Leuven.
21. (2021) *EPC2152 80 V, 15 A ePower™ Stage Preliminary Datasheet, Rev. 2.0, Efficient Power Conversion Corporation*. El Segundo, CA, USA. pp. 1–16.
22. (2022) *LMG5200 80-V, 10-A GaN Half-Bridge Power Stage*. [Online] Available from: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmg5200.pdf>
23. ASIC Products Mindcet. (n.d.) *MDC901 High Performance, 200 V Gate Driver IC*. [Online] Available from: <https://www.mindcet.com/asic-products> (Accessed: 14.11.2022).
24. Polyntsev, E.S., Prokazina, I.Y. & Bartenev, A.I. (2022) Odnokanal'nyj GaN zatvornyj drayver upravleniya silovym normal'no-zakrytym n-GaN tranzistorom [Single channel GaN-based e-mode n-GaN HEMT gate driver]. In: *Devyatnadcataya Vserossiyskaya konferenciya studentcheskih nauchno-issledovatel'skih inkubatorov* [Nineteenth All-Russian Conference of Student Research Incubators]. STT Publishing. pp. 75.
25. Infineon. (2006) *IRFB4020PBF, Digital Audio MOSFET*. [Online] Available from: <https://www.infineon.com/dgdl/irfb4020pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015356158ffd1e05>

Информация об авторах:

Бартенев Александр Иванович – аспирант Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия). E-mail: san4ubas1@gmail.com

Кагадей Валерий Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник НОЦ «Инжиниринговый центр СВЧ-техники и технологии» Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: vak@mail.tsu.ru

Коряковцев Артём Сергеевич – аспирант, младший научный сотрудник НИИ микроэлектронных систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия). E-mail: artem.s.koriakovtsev@tusur.ru

Полынтsev Егор Сергеевич – аспирант, лаборант НОЦ «Инжиниринговый центр СВЧ техники и технологии» Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: e.polyntsev@gmail.com

Помазанов Алексей Владимирович – аспирант, младший научный сотрудник НИИ «Микроэлектронных систем» Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия). E-mail: aleksei.v.pomazanov@tusur.ru

Проказина Ирина Юрьевна – аспирант, лаборант НОЦ «Инжиниринговый центр СВЧ техники и технологии» Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: irina_tusur@mail.ru

Шеерман Фёдор Иванович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории СВЧ-микроэлектроники НИИ микроэлектронных систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия). E-mail: fish@tusur.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Bartenev Aleksandr I., PhD student, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russian Federation). E-mail: san4ubas1@gmail.com.

Kagadey Valery A., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), professor, senior researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: vak@mail.tsu.ru.

Koryakovtsev Artyom S., PhD student, junior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russian Federation). E-mail: artem.s.koriakovtsev@tusur.ru

Polyntsev Egor S., PhD student, laboratory assistant, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: e.polyntsev@gmail.com.

Pomazanov Aleksei V., PhD student, junior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russian Federation). E-mail: aleksei.v.pomazanov@tusur.ru.

Prokazina Irina Y., PhD student, laboratory assistant, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: irina_tusur@mail.ru.

Sheyerman Feodor I., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), leading researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russian Federation). E-mail: fish@tusur.ru.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 23.01.2023

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 23.01.2023