

УДК 621.314.04

Шифр специальности ВАК 2.4.1

Е.С. Полынцев, И.Ю. Кодорова, А.И. Бартенев,
А.А. Аксенов, М.С. Воробьев, В.А. Кагадей

Силовая GaN-микросборка на основе AlN-DBC-платы с металлизированными переходными отверстиями

Актуальность. Благодаря высокой скорости переключения и низким потерям проводимости, GaN-транзисторы рассматриваются как наиболее перспективная электронная компонентная база в импульсных преобразователях электрической энергии. Однако их широкое внедрение сдерживается двумя ключевыми факторами: необходимостью минимизации паразитных индуктивностей и требованием к обеспечению эффективного теплоотвода. **Цель исследования.** Целью исследования является разработка и экспериментальная верификация силовой GaN-микросборки, в которой два GaN-транзистора, затворный драйвер и пассивные компоненты смонтированы на керамической AlN-DBC-плате с металлизированными переходными отверстиями, обеспечивающей низкие значения паразитной индуктивности межсоединений, а также теплового сопротивления микросборки. **Методы.** Схемотехническое моделирование электрических характеристик проводилось в среде LTSpice. Топологическое проектирование керамической платы выполнялось в Altium Designer. Электрическое и тепловое моделирование осуществлялось в системе инженерного анализа ANSYS Electronics Desktop: для экстракции паразитных индуктивностей межсоединений использовался модуль Q3D, а для расчета распределения температуры и определения теплового сопротивления сборки – модуль Iserac. Экспериментальная верификация включала тест двойным импульсом для оценки коммутационных перенапряжений и пиковых токов, а также инфракрасную термографию работающего образца. **Научная новизна.** Предложена оригинальная конструкция силовой GaN-микросборки на основе AlN-керамической платы с двусторонней медной металлизацией и переходными металлизированными отверстиями, характеризующаяся низкими величинами индуктивностей затворного и силового контуров GaN-транзисторов, а также теплового сопротивления микросборки. **Результаты.** Силовая GaN-микросборка имеет два независимых канала, каждый из которых обеспечивает ток до 7 А, рабочее напряжение не менее 100 В. Показано, что для данной конструкции микросборки индуктивность в затворном контуре обоих каналов имеет характерную величину 2,6 и 2,2 нГн, а добавочная паразитная индуктивность в силовой контур транзистора не превышает 0,5 нГн. Согласно результатам моделирования и экспериментальных исследований, перенапряжение на стоке транзистора не превышало 20 В при пиковом токе в индуктивной нагрузке 125 А, а тепловое сопротивление «активная область силового транзистора – окружающая среда» не превышает 36 К/Вт. **Практическая значимость.** GaN-микросборка предназначена для применения в составе высокоплотных низковольтных импульсных преобразователей, работающих на частотах выше 0,5 МГц, и позволяет поднять их удельную мощность.

Ключевые слова: силовая GaN-электроника, GaN-микросборка, экстракция паразитных параметров, DBC-керамика, металлизированные переходные отверстия, низкая паразитная индуктивность, гибридная интеграция.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-2-179-188

Введение

Силовые транзисторы на основе нитрида галлия (GaN) характеризуются улучшенным комплексом электрических параметров по сравнению с традиционными аналогами на основе кремния (Si) [1]. Ключевыми из них являются рекордно низкое сопротивление канала в открытом состоянии (единицы–десятки мОм), позволяющее существенно снизить статические потери на проводимость, а также экстремально малые времена переключения (единицы нс), обеспечивающие возможность работы на частотах до нескольких мегагерц с динамическими потерями, на порядок меньшими, чем у Si-приборов [2, 3]. Современные коммерчески доступные GaN-транзисторы и диоды Шоттки рассчитаны на рабочие напряжения от 40 до 650 В и токи до 150 А [4], при этом они демонстрируют высокую температурную стабильность характеристик и сохраняют работоспособность при температурах кристалла до 200 °С [5]. Однако столь выдающиеся параметры неизбежно сопровождаются повышенной удельной тепловой мощностью [6] и

высокой чувствительностью к паразитным индуктивностям монтажа [7, 8], что предъявляет жесткие требования к конструктивному и топологическому исполнению окружения силовых GaN-транзисторов. В этой связи научно-техническая задача по разработке новых конструкций силовых GaN-микросборок и модулей, обеспечивающих малые паразитные индуктивности и эффективный теплоотвод, является актуальной.

Из литературы [9, 10] известны конструкции, основанные на 3D-интеграции кристаллов силовых приборов в объем органической печатной платы. Такие конструкции обладают минимальной длиной проводников и, следовательно, низкой паразитной индуктивностью межсоединений (менее 1 нГн). Основным недостатком таких конструкций является значительное тепловое сопротивление, обусловленное низкой теплопроводностью материала печатной платы, которое приводит к интенсивному саморазогреву кристаллов силовых приборов в ходе их работы. Это ограничивает максимальную электриче-

скую мощность устройств на основе подобных конструкций.

Конструкции классических силовых модулей на основе кремниевых силовых приборов [11–13] основаны на применении высокотеплопроводных керамических подложек с двухсторонней металлизацией и проволочных межсоединений. Такие конструкции обладают низким тепловым сопротивлением, однако характеризуются повышенной паразитной индуктивностью силового контура $L_{\text{сил}}^{\text{пар}}$ (порядка 5–10 нГн), которая ограничивает КПД устройств на основе подобных конструкций на повышенных рабочих частотах.

Существуют также и гибридные конструкции, основанные на сочетании керамических металлизированных подложек и органических печатных плат [14–16], обеспечивающие как эффективный теплоотвод, так и низкие паразитные индуктивности межсоединений. В конструкциях подобного типа кристаллы силовых транзисторов монтируются на печатную плату, а керамическая плата крепится к тыльной стороне кристаллов для отвода тепла. Такая конструкция обеспечивает $L_{\text{сил}}^{\text{пар}}$ около 1 нГн, а также низкое тепловое сопротивление. Недостатком такого решения является невозможность организации эффективного двухстороннего теплоотвода вследствие низкой теплопроводности печатной платы.

Ведущий производитель силовых низковольтных GaN-транзисторов, компания EPC, рекомендует осуществлять монтаж кристаллов силовых транзисторов с бампами напрямую на поверхность печатных плат [17, 18]. Такой способ монтажа позволяет обеспечить малую величину $L_{\text{сил}}^{\text{пар}}$ порядка 0,4 нГн [17] за счет отказа от классического корпуса. Но из-за низкой теплопроводности печатных плат для этого способа характерны высокие значения теплового сопротивления [18].

В ранее опубликованных работах [19, 20] была предложена конструкция силовой GaN-микросборки, основанная на применении керамической платы с двусторонней медной металлизацией и переходными металлизированными отверстиями. Внешний вид

данной конструкции в поперечном сечении представлен на рис. 1.

На лицевой стороне керамической платы методом перевернутого монтажа (flip-chip) [21] монтировались кристаллы силовых GaN-транзисторов, затворные драйверы и пассивные чип-компоненты. Обратной стороной керамическая плата монтировалась на поверхность органической печатной платы. Применение переходных металлизированных отверстий в керамической плате обеспечивало минимальную длину проводников, и как следствие малую величину паразитных индуктивностей в силовом контуре GaN-транзистора. Отвод тепла в данной конструкции может осуществляться в двух направлениях: через радиатор, расположенный на тыльной стороне кристалла силового GaN-транзистора, и через объем керамической платы, переходные тепловые отверстия в печатной плате на радиатор или основание корпуса.

На основании электрического и теплового моделирования, описанного в работах [19, 20], была показана перспективность новой конструкции силовых GaN-микросборок. Настоящая работа является продолжением ранее опубликованных работ, в которой будут представлены результаты моделирования и экспериментальной верификации силовой GaN-микросборки.

Методика

Проектирование силовой GaN-микросборки выполнялось с применением нескольких программных систем автоматизированного проектирования (САПР). Топология керамической платы проектировалась в Altium Designer. Разработка 3D-модели силовой GaN-микросборки осуществлялась в САПР для трехмерного моделирования FreeCAD. Электрическое и тепловое моделирование микросборки выполнялось методом конечных элементов в автоматизированной системе инженерного анализа ANSYS Electronics Desktop Student.

Электрическое моделирование силовой GaN-микросборки заключалось в экстракции паразитных параметров металлизации керамической платы и исследовании их влияния на динамические характеристики.

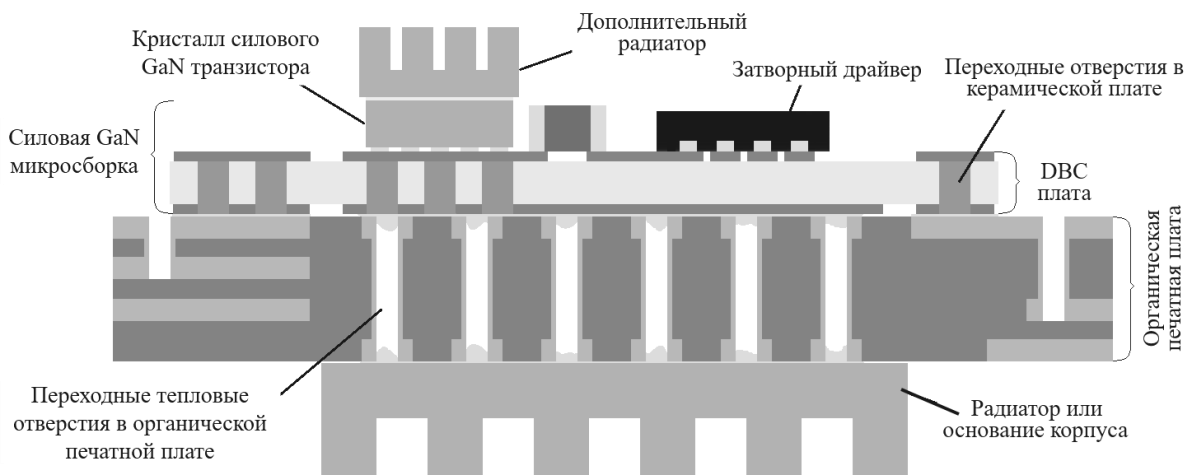


Рис. 1. Новая конструкция силовой GaN-микросборки

Экстракция паразитных параметров металлизации керамической платы выполнялась с использованием модуля Q3D. В качестве входных и выходных терминалов, через которые протекал электрический ток, использовались поверхности контактных площадок на керамической плате. При электрическом моделировании для используемых материалов задавались следующие физические параметры:

- удельная электрическая проводимость медных проводников керамической платы составляла 58×10^6 См/м;
- эквивалентная проводимость металлизированных отверстий в керамической плате составляла 34×10^6 См/м;
- диэлектрическая постоянная AlN-подложки составляла 8,5, а тангенс угла диэлектрических потерь 0,0003.

Исследование влияния паразитных параметров межсоединений на динамические характеристики микросборки выполнялось при помощи теста двойным импульсом [22]. Исследование проводилось на одном канале упрощенной имитационной модели микросборки в среде моделирования электронных схем LTSpice.

Имитационная модель канала А силовой GaN-микросборки, представленная на рис. 2, состояла из источника управляющих сигналов V_1 , источника входного напряжения V_2 , транзистора VT₁ EPC2016C, затворного резистора R_1 сопротивлением 20 Ом, совокупности паразитных индуктивностей металлизации керамической платы $L_1 - L_4$, паразитной индуктивности измерительной платы L_5 величиной 2 нГн, диода Шоттки VD₁ 10L100SP, а также нагрузки, состоящей из резистивного шунта R_2 сопротивлением 0,1 Ом и индуктивности L_6 величиной 5 мкГн.

Из результатов электрического моделирования теста двойным импульсом канала А имитационной модели микросборки вычислялись величины коммутационных перенапряжений на затворе, $U_{\text{ЗИ}}^{\text{перенапр}}$ и стоке транзистора, $U_{\text{СИ}}^{\text{перенапр}}$ при максимальном входном напряжении и импульсном токе в индуктивной нагрузке, $I_{L_{\text{СИ}}}^{\text{макс}}$.

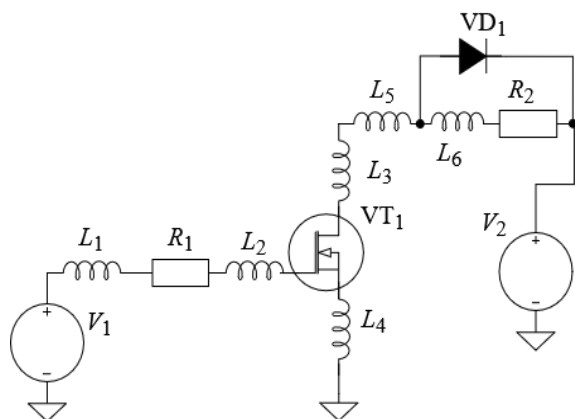


Рис. 2. Имитационная модель канала А силовой GaN-микросборки

Тепловое моделирование силовой GaN-микросборки заключалось в расчёте распределения температуры по объёму микро модуля в момент достижения стационарного состояния при помощи модуля Iserac. При проведении теплового моделирования рассматривался одноканальный режим работы микросборки, при котором основным источником тепла являлся силовой GaN-транзистор, на котором рассеивался 1 Вт тепловой мощности. При тепловом моделировании для используемых материалов задавались тепловые характеристики, представленные в табл. 1.

В начальный момент времени температура силовой GaN-микросборки считалась равной температуре окружающей среды ($T_{\text{сред}} = 22$ °С). Значение скорости воздушного потока было задано 0,5 м/с, что соответствовало условиям естественной конвекции.

Эквивалентное тепловое сопротивление активной области силового транзистора – окружающая среда R_{th} микросборки рассчитывалось по формуле (1):

$$R_{\text{th}} = \frac{(T_{\text{крист}} - T_{\text{сред}})}{P_{\text{расс}}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{крист}}$ – температура кристалла при достижении стационарного состояния; $T_{\text{сред}}$ – температура окружающей среды; $P_{\text{расс}}$ – рассеиваемая тепловая мощность.

Для сравнения с конструкцией между собой, по формуле (2) рассчитывалась удельная величина теплового сопротивления между кристаллом силового транзистора и окружающей средой, нормированная на площадь кристалла $S_{\text{крист}}$:

$$R_{\text{th}}^{\text{уд}} = \frac{(T_{\text{крист}} - T_{\text{сред}}) \cdot S_{\text{крист}}}{P_{\text{расс}}}. \quad (2)$$

Экспериментальная верификация силовой GaN-микросборки включала в себя измерение динамических электрических и тепловых характеристик. Принципиальная электрическая схема для проведения измерений приведена на рис. 3 и состоит из измерительной печатной платы, функционального генератора сигналов G₁ Rigol DG2102, источника питания V_1 GW Instek SPD-73606, нагрузки, а также осциллографа P₁ Rigol MSO8064.

Таблица 1

Перечень материалов и их тепловые характеристики

Структурный элемент	Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Силовой GaN-транзистор	GaN/Si	150
Выходы силового GaN-транзистора	Олово	50
Припой силового GaN-транзистора	Kester SAC305	55
Верхний проводящий слой	Cu	400
Подложка	AlN	170
Нижний проводящий слой	Cu	400
Припой керамической платы	ПОС61	57
Переходные тепловые отверстия в печатной плате	Cu	400
Припой радиатора	ПОС61	57
Радиатор	Cu	400

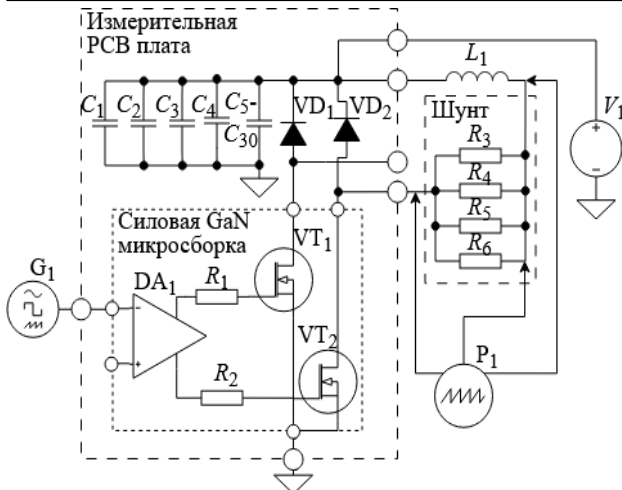


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема для экспериментальной верификации силовой GaN-микросборки

На измерительной печатной плате размещались: силовая GaN-микросборка, магазин керамических конденсаторов ($C_1 - C_{30}$) с рабочим напряжением до 100 В, емкостью 10 мкФ и шунтирующие диоды VD_1 и VD_2 для каждого канала. В качестве шунтирующих диодов VD_1 и VD_2 был выбран диод Шоттки 10L100SP, имеющий следующие основные характеристики: максимальное обратное напряжение – 100 В, средний выпрямленный ток – 10 А, импульсный прямой ток – 200 А, прямое падение напряжения – 0,63 В при токе 10 А. Выбор данных диодов обусловлен их высокой скоростью переключения и низким прямым падением напряжения, что минимизирует влияние на коммутационные процессы. При измерении тепловых характеристик нагрузка представляла собой четыре параллельно соединенных резистора ($R_3 - R_6$) сопротивлением 1 Ом каждый, образующих измерительный шунт. При измерении динамических электрических характеристик нагрузка представляла собой измерительный резистивный шунт R_3 сопротивлением 0,1 Ом с последовательно соединенным дросселем L_1 индуктивностью 3 мкГн.

Измерение динамических электрических характеристик силовой GaN-микросборки заключалось в проведении теста двойным импульсом в одноканальном режиме. Из полученных экспериментальных данных вычислялись следующие динамические параметры:

- величина коммутационных перенапряжений на затворе, $U_{\text{ЗИперенапр}}^{\text{эксп}}$ и стоке, $U_{\text{СИперенапр}}^{\text{эксп}}$ транзистора при максимальном входном напряжении и импульсном токе в индуктивной нагрузке, $I_{L\text{макс}}^{\text{эксп}}$;
- скорость нарастания импульса входного напряжения, $dU_{\text{си}}/dt$;
- скорость спада импульса управляющего напряжения, $dU_{\text{зи}}/dt$.

Измерение тепловых характеристик заключалось в расчете теплового сопротивления R_{th} микросборки по формуле (1) на основе результатов измерений температуры поверхности кристалла транзи-

стора и выделяемой тепловой мощности. Измерения тепловой мощности проводились на частоте 10 кГц; ширина импульса определяла электрическую мощность, рассеиваемую на транзисторах. Температура поверхности кристалла измерялась при помощи тепловизора testo 875i. Коэффициент отражения для кристаллов силовых транзисторов составлял 0,77. Тепловая мощность представляла собой отношение полной мощности ко времени работы до достижения стационарного состояния.

Разработка силовой GaN-микросборки

Силовая GaN-микросборка разрабатывалась с учетом следующих технических требований:

- наличие двух выходных каналов;
- выходной ток в канале транзистора ≥ 7 А;
- максимальное напряжение сток-исток силовых транзисторов ≥ 100 В;
- сопротивление канала в открытом состоянии силового транзистора ≤ 16 мОм при 25 °С.

Схемотехническая реализация силовой GaN-микросборки детально описана в [19], она имела двухканальный затворный драйвер нижнего уровня UCC27524, который управлял двумя силовыми GaN-транзисторами EPC2016C. Силовая GaN-микросборка имела три силовых вывода PA, PB и PGND и четыре управляющих вывода EN, INA, INB и VDD.

Для изготовления керамической платы силовой GaN-микросборки использовалась подложка из AlN толщиной 380 мкм с двухсторонней медной DBC-металлизацией толщиной 200 мкм.

Технология DBC-металлизации обеспечивает высокую токовую и тепловую проводимость, а также хорошее рассеяние тепла через высокочистую медную металлизацию. Электрический контакт между металлизацией на лицевой и обратной сторонах керамической платы обеспечивался через глухие металлизированные переходные отверстия. Заполнение отверстий осуществлялось с помощью медного микрофиллера и серебросодержащей паяльной пасты WNB-217.

Внешний вид топологии лицевой и обратной сторон керамической платы приведен на рис. 4. Керамическая плата имела размер 10,6×8,2 мм.

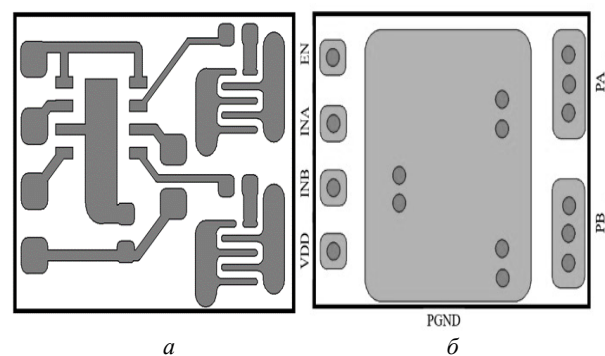


Рис. 4. Топология керамической платы силовой GaN-микросборки: а – топология лицевой стороны керамической платы; б – топология обратной стороны керамической платы

Изготовление силовой GaN-микросборки

Изготовление экспериментального образца силовой GaN-микросборки осуществлялось в три технологических этапа: 1) формирование топологии металлизации и отверстий в керамической плате; 2) металлизация отверстий; 3) монтаж компонентов на лицевую поверхность керамической платы.

Формирование топологии металлизации и глухих отверстий диаметром 500 мкм в керамической плате выполнялось методом лазерной абляции с использованием ЧПУ с пикосекундным лазером УФ-диапазона. Металлизация глухих отверстий в керамической плате, выполнялась с помощью медного микрофиллера диаметром 250 мкм и бессвинцовой серебродержательной паяльной пасты WNB-217 с температурой плавления 217 °С, нанесенной методом дозирования.

На рис. 5 представлен общий вид изготовленной силовой GaN-микросборки.

Монтаж компонентов на лицевую поверхность керамической платы осуществлялся по технологии поверхностного и перевернутого монтажа с помощью паяльной пасты SAC305 с температурой плавления 220 °С.

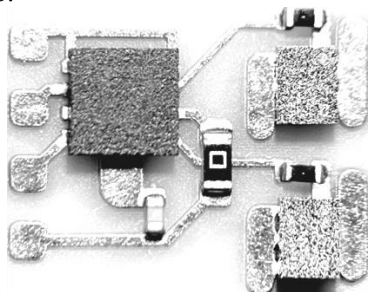


Рис. 5. Общий вид силовой GaN-микросборки

Исследование паразитных параметров

Наиболее критичными контурами силовой GaN-микросборки, в которых контролировались паразитные параметры, являлись затворный и силовой контуры. Затворный контур канала *A* образуется проводниками, соединяющими OUTA-терминал драйвера и, через резистор R_1 , затворный терминал транзистора VT₁, а также обратный путь через PGND и формирующими индуктивности L_1 и L_2 . Затворный контур канала *B* образуется проводниками, соединяющими OUTB-терминал драйвера, и через резистор R_2 , затворный терминал транзистора VT₂, а также обратный путь через PGND и формирующими индуктивности L_3 и L_4 .

Часть силового контура канала *A* образуется проводниками, соединяющими силовой терминал PA и стоковый терминал транзистора VT₁, а также истоковый терминал транзистора VT₁ и силовой терминал PGND и формирующими добавочные паразитные индуктивности L_5 и L_6 . Часть силового контура канала *B* образуется проводниками, соединяющими силовой терминал PB и стоковый терминал транзистора VT₂, а также истоковый терминал транзистора VT₂ и силовой терминал PGND и формирующими добавочные паразитные индуктивности L_7 и L_8 . Результаты экстракции приведены в табл. 2.

Таблица 2
Значения паразитных параметров керамической DBC-платы

Контур	Индуктив-ность	Индуктивность на постоянном токе, нГн		Индуктивность на частоте 1 МГц, нГн
Затворный контур канала <i>A</i>	L_1	2,4	2,6	1,4
	L_2	0,2		
Затворный контур канала <i>B</i>	L_3	2	2,2	1,15
	L_4	0,2		
Часть силового контура канала <i>A</i>	L_5	0,25	0,5	0,7
	L_6	0,25		
Часть силового контура канала <i>B</i>	L_7	0,25	0,5	0,3
	L_8	0,25		

По результатам моделирования, выполненного согласно описанной методике, суммарная паразитная индуктивность затворного контура составила 2,6 нГн для канала *A* и 2,2 нГн для канала *B*. Добавочная индуктивность к паразитной индуктивности силового контура каждого канала составила около 0,5 нГн.

На рис. 6 приведены результаты динамических измерений силовой GaN-микросборки с помощью теста двойным импульсом, полученные в результате моделирования, а также результаты, полученные экспериментально. Моделирование и эксперимент выполнялись по описанной ранее методологии со следующими параметрами: напряжение на входе микросборки – 80 В, амплитуда управляющих импульсов – 5,5 В, длительность первого и второго импульсов – 3 мкс, длительность паузы между импульсами – 3 мкс, время нарастания и спада фронта управляющего импульса – 9 нс.

Результаты моделирования. Согласно результатам моделирования теста двойным импульсом, при закрытии транзистора на стоке возникали коммутационные перенапряжения $U_{СИ}^{перенапр}$, величина которых составляет 20 В при пиковом токе в индуктивности L_1 $I_{L_{СИ}}^{макс}$ величиной 120 А. Они обусловлены

наличием паразитных индуктивностей измерительной платы и добавочной паразитной индуктивности, вносимой элементами монтажа микросборки. При открытии транзистора на его затворе возникали коммутационные перенапряжения $U_{ЗИ}^{перенапр}$ величиной 0,5 В, обусловленные наличием паразитных индуктивностей в затворном контуре канала *A* микросборки.

Экспериментальные результаты. Согласно результатам экспериментальных измерений, в индуктивности L_1 был достигнут пиковый ток $I_{L_{ЭКСП}}^{макс}$ величиной 125 А. Из-за паразитных индуктивностей в измерительной плате и микросборке при открытии и закрытии транзистора возникали коммутационные перенапряжения $U_{ЗИ}^{перенапр}$ и $U_{СИ}^{перенапр}$. При величине $dU_{ЗИ}/dt$ на затворе транзистора в 0,56 В/нс коммутационное перенапряжение $U_{ЗИ}^{перенапр}$ достигало 0,6 В. На стоке транзистора при $dU_{СИ}/dt = 18$ В/нс величина коммутационных перенапряжений $U_{СИ}^{перенапр} = 20$ В.

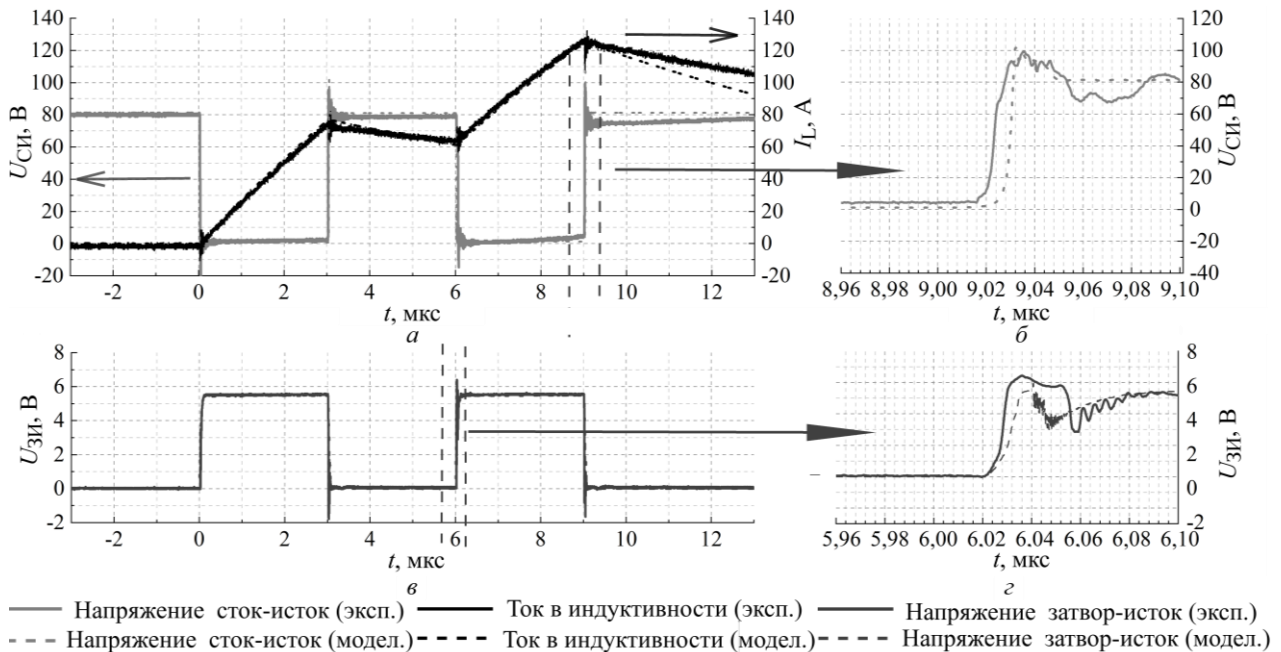


Рис. 6. Результаты моделирования и измерений силовой GaN-микросборки тестом двойным импульсом:

a – напряжение сток-исток U_{DS} и ток в индуктивной нагрузке I_L ; b – напряжение затвор-исток U_{GS} ; c – увеличенная форма напряжения U_{DS} ; d – увеличенная форма напряжения U_{GS}

Экспериментальные значения перенапряжений и тока в индуктивной нагрузке соответствуют значениям, полученным в результате моделирования имитационной модели силовой GaN-микросборки.

Полученные экспериментальные и смоделированные значения коммутационных перенапряжений в силовой GaN-микросборке при максимальном пиковом токе в индуктивной нагрузке, вызванные паразитными индуктивностями межсоединений, не превышали значения максимального импульсного рабочего напряжения, что подтверждает ее работоспособность в режиме жесткой коммутации.

Исследование тепловых параметров

Распределение температуры по объему силовой GaN-микросборки, полученное в результате моделирования при достижении стационарного состояния, представлено на рис. 7.

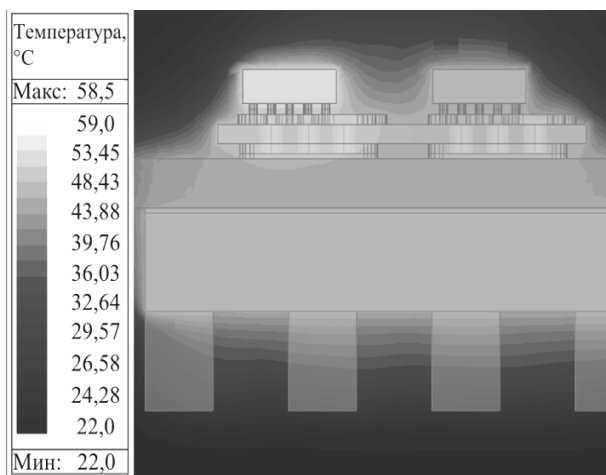


Рис. 7. Распределение температуры по объему силовой GaN-микросборки

В стационарном состоянии температура GaN-транзисторов не превышала 58 °C. Рассчитанное по формуле (1) эквивалентное тепловое сопротивление микросборки R_{th} составило 36 К/Вт. На рис. 8 приведена термограмма, отражающая распределение температуры по поверхности силовой GaN-микросборки в составе измерительной платы при достижении стационарного состояния.

Согласно термограмме силовой GaN-микросборки, полученной при помощи ИК-тепловизора, максимальная температура обратной стороны кристалла достигала значения 42 °C при средней тепловой мощности, рассеиваемой кристаллом равной 0,6 Вт. Таким образом, экспериментальное значение R_{th} микросборки составило 33 К/Вт, что достаточно точно согласуется со значением 36 К/Вт, полученным в результате моделирования.

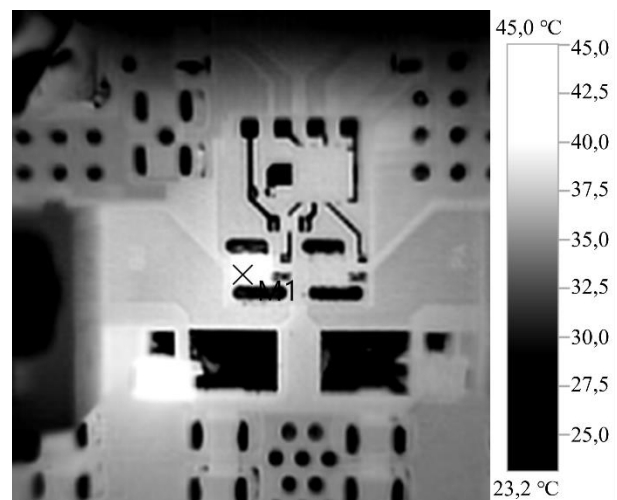


Рис. 8. Термограмма силовой GaN-микросборки

Сравнение с аналогами

На рис. 9 приведены результаты сравнения различных конструкций силовых GaN-микросборок и модулей по величинам удельного теплового сопротивления и паразитной индуктивности силового контура. Значения, приведенные на рис. 9, носят оценочный характер и были составлены на основе данных, опубликованных в работах [9–18], часть из которых были получены экспериментально, а часть – в результате моделирования, граничные условия которого также отличались. Расчет удельного теплового сопротивления $R_{th}^{уд}$ осуществлялся по формуле (2) в соответствии с методикой, описанной ранее.

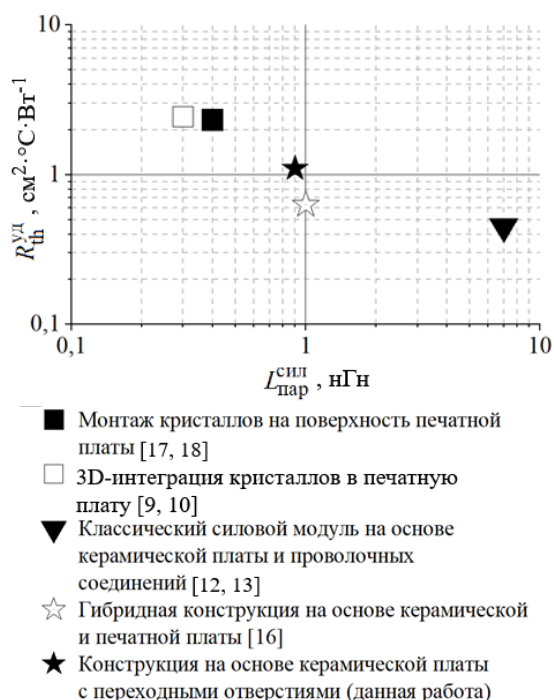


Рис. 9. Сравнительный анализ различных конструкций силовых микросборок и модулей по удельному тепловому сопротивлению и паразитной индуктивности силового контура [9–18]

В сравнении с конструкциями на основе керамических плат с проволочными межсоединениями [12, 13], где паразитная индуктивность силового контура достигает 5–10 нГн, разработанная новая конструкция микросборки, обеспечивала значительное снижение этого параметра до уровня, менее чем 1 нГн. Переходные металлизированные отверстия в керамической плате вносят дополнительную индуктивность около 0,5 нГн к базовому значению 0,4 нГн, характерному для монтажа на печатную плату [17, 18]; в результате суммарная индуктивность силового контура достигает 0,9 нГн, что сопоставимо с уровнем гибридных конструкций [14–16]. При этом новая конструкция обеспечивает более чем двукратное снижение теплового сопротивления по сравнению с аналогами на основе печатных плат [9, 10, 17, 18].

Таким образом, разработанная конструкция по величинам $L_{пар}^{сил}$ и $R_{th}^{уд}$ занимает промежуточное

положение между классическими конструкциями силовых модулей [12, 13] на основе керамических плат с проволочными соединениями и конструкциями на основе печатных плат [9, 10, 17, 18], приближаясь к показателям, характерным для гибридных конструкций на основе сочетания керамических и печатных плат [16]. При этом, в отличие от данных гибридных конструкций, предложенная новая конструкция состоит из меньшего числа конструктивных элементов и имеет более простую технологию изготовления.

Заключение

Разработана, реализована и исследована оригинальная силовая GaN-микросборка на основе AlN-DBC-платы с металлизированными переходными отверстиями. Согласно результатам моделирования и измерений методом двойного импульса, перенапряжение на стоке транзистора не превышало 20 В при пиковом токе в индуктивной нагрузке 125 А, а добавочная паразитная индуктивность силового контура не превышала 0,5 нГн. Экспериментально измеренное значение теплового сопротивления R_{th} микросборки не превышало 33 К/Вт, что хорошо согласовывалось со значением 36 К/Вт, полученным в результате моделирования.

Результаты экспериментальных исследований и численного моделирования подтвердили, что разработанная силовая GaN-микросборка сочетает в себе низкую паразитную индуктивность, характерную для печатных плат, и эффективный двухсторонний теплоотвод, характерный для высокотеплопроводных керамических подложек. Это обеспечивает рекордные электрические и тепловые характеристики силовой GaN-микросборки по сравнению с уже известными техническими решениями. Силовые GaN-микросборки могут применяться в составе высокочастотных высокоплотных DC/DC-преобразователей и высокочастотных инверторах большой мощности.

Литература

1. Recent advances in GaN-based power HEMT devices / J. He, W.C. Cheng, Q. Wang, K. Cheng, H. Yu, Y. Chai // *Advanced Electronic Materials*. – 2021. – Vol. 7, No. 4. – P. 2001045.
2. Reliability, applications and challenges of GaN HEMT technology for modern power devices: A review / N. Islam, M.F.P. Mohamed, M.F.A.J. Khan, S. Falina, H. Kawarada, M. Syamsul // *Crystals*. – 2022. – Vol. 12, No. 11. – P. 1581.
3. Garg T. Recent developments, reliability issues, challenges and applications of GaN HEMT technology / T. Garg, S. Kale // *IEEE Electron Devices Reviews*. – 2024. – Vol. 1. – P. 16–30.
4. Udabe A. Gallium nitride power devices: A state of the art review / A. Udabe, I. Baraia-Etxaburu, D.G. Diez // *IEEE Access*. – 2023. – Vol. 11. – P. 48628–48650.
5. High-temperature electrical performances and physics-based analysis of p-GaN HEMT-device / S. Li, S. Liu, Y. Tian, C. Zhang, J. Wei, X. Tao, N. Li, L. Zhang, W. Sun // *IET Power Electronics*. – 2020. – Vol. 13, No. 3. – P. 420–425.
6. Thermal analysis of flip-chip bonding designs for GaN-power-HEMTs with an on-chip heat-spreading layer / K.B. Hong, C.Y. Peng, W.C. Lin, K.L. Chen, S.C. Chen, H.C. Kuo, E.Y. Chang, C.H. Lin // *Micromachines*. – 2023. – Vol. 14, No. 3. – P. 519.

7. Design of Low Parasitic Inductance GaN-HEMT-Flip-Chip Power Module / M.D. Rahman, T. Akter, A.S.M.K. Hasan, H.A. Mantooth, X. Song // 2025 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – Atlanta, GA, USA: IEEE, 2025. – P. 1844–1849.

8. A highly integrated GaN power module with low parasitic inductance and high thermal performance / H. Kong, F. Yang, C. Yang, Y. Zhang, Z. Wang, Y. Yao, Y. Wang, L. Wang // 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – Detroit, MI, USA: IEEE, 2022. – P. 1–7.

9. High power-density 3D integrated power supply module based on panel-level PCB embedded technology / F. Hou, X. Guo, Q. Wang, W. Wang, T. Lin, L. Cao, G.Q. Zhang, J.A. Ferreira // 2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). – San Diego, CA, USA: IEEE, 2018. – P. 1365–1370.

10. Mrad R. A PCB based package and 3D-assembly for high power density converters / R. Mrad, J. Morand, R. Perrin, S. Mollov // 2019 IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging (IWIPP). – Toulouse, France: IEEE, 2019. – P. 73–77.

11. IGBT power module design for suppressing gate voltage spike at digital gate control / Z. Lou, T. Mamee, K. Hata, M. Takamiya, S.I. Nishizawa, W. Saito // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 6632–6640.

12. Automotive power module packaging: Current status and future trends / Y. Yang, L. Dorn-Gomba, R. Rodriguez, C. Mak, A. Emadi // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 160126–160144.

13. Смирнов В.И. Моделирование теплоэлектрических процессов в силовых модулях на MOSFET-транзисторах / В.И. Смирнов, А.М. Ходаков, А.А. Гавриков // РЭН-СИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2023. – Т. 15, № 2. – С. 117–124.

14. Implementation and switching behavior of a PCB-DBC-IGBT-module based on the power chip-on-chip 3-D-concept / J.L. Marchesini, P.O. Jeannin, Y. Avenas, J. Delaine, C. Buttay, R. Riva // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016. – Vol. 53, No. 1. – P. 362–370.

15. Embedded PCB and DBC-integrated design of 650 V GaN-power modules with enhanced thermal and electrical performance / A.Y. Choi, J. Jeon, J.H. Lim, S.W. Yoon // Microelectronics Reliability. – 2026. – Vol. 179. – P. 116053.

16. PCB-on-DBC GaN power module design with high-density integration and double-sided cooling / X. Tian, N. Jia, D. DeVoto, P. Paret, H. Bai, L.M. Tolbert, H. Cui // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2023. – Vol. 39, No. 1. – P. 507–516.

17. Morganti T. PCB Layout Rules for Converters and Motor Drives // Efficient Power Conversion [Электронный ресурс]. – URL: <https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/presentations/pcb-layout-rules-04292025.pdf> (дата обращения: 20.03.2026).

18. EPC2016C – eGaN Fet Datasheet // Efficient Power Conversion [Электронный ресурс]. – URL: https://epc-co.com/epc/portals/0/epc/documents/datasheets/EPC2016C_datasheet.pdf#page=1.00 (дата обращения: 20.03.2026).

19. Design and Optimization of 100 V GaN Multi-chip Power Micromodule Based on AlN DBC Substrate / E.S. Polyntsev, I.Y. Kodorova, A.A. Aksenov, V.A. Kagadey // 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – Altai, Russian Federation: IEEE, 2024. – P. 1180–1184.

20. Kodorova I.Y. Thermal Analysis of Packaging Solution for GaN-Multi-chip-Power Micromodule / I.Y. Kodorova, E.S. Polyntsev, V.A. Kagadey // 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and

Materials (EDM). – Altai, Russian Federation: IEEE, 2024. – P. 1230–1233.

21. Gan C.L. Advanced flip chip packaging / C.L. Gan, C.Y. Huang // Interconnect Reliability in Advanced Memory Device Packaging. – Cham: Springer International Publishing, 2023. – P. 67–94.

22. Levett D. Double pulse testing: The how, what and why / D. Levett, Z. Zheng, T. Frank // Infineon Technologies. – 2020. – P. 30–35 [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.scribd.com/document/803783300/Infineon-Double-pulse-testing-Bodos-power-systems-Article-v01-00-EN> (дата обращения: 20.03.2026).

Полынец Егор Сергеевич

Аспирант каф. физической электроники (ФЭ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-4368-8258
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61
Эл. почта: egoleo@mail.ru

Кодорова Ирина Юрьевна

Инж.-электроник НПП «Радар ммс», НПК «Томское» В. Высоцкого ул., 28/3, г. Томск, Россия, 634040
ORCID: 0009-0009-8521-8343
Тел.: +7 (382-2) 61-40-00
Эл. почта: irina_tusur@mail.ru

Бартенев Александр Иванович

Аспирант каф. промышленной электроники (ПрЭ) ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0009-0001-2082-9313
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61
Эл. почта: san4ubas@mail.ru

Аксенов Андрей Александрович

Аспирант Института сильноточной электроники Сибирского отд. Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) Академический пр-т, 2/3, г. Томск, Россия, 634055
Тел.: +7-905-990-57-14
Эл. почта: aksenov@mail.tsu.ru

Воробьев Максим Сергеевич

Д-р. тех. наук. с.н.с.
Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-5136-5905
Тел.: +7-913-886-95-37
Эл. почта: vormas@tpu.ru

Кагадей Валерий Алексеевич

Д-р физ.-мат. наук, проф. каф. ФЭ ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-48-61
Эл. почта: vak@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию: 29.04.2026.

Принята к публикации: 07.09.2026.

Polyntsev E.S., Kodorova I.Y., Bartenev A.I., Aksenov A.A., Vorobyov M.S., Kagadey V.A.

GaN-power micromodule based on an AlN-DBC-substrate with metallized vias

Relevance. The high switching speed and low conduction losses of GaN-transistors make them one of the most promising electronic component technologies for switched-mode power converters. However, their widespread adoption is constrained by two key factors: the need to minimize parasitic interconnection inductances and the requirement to ensure efficient heat dissipation. **Purpose of the study.** The study aims to develop and experimentally validate a GaN power micromodule in which two GaN transistors, a gate driver, and passive components are mounted on an AlN direct-bonded copper (DBC) substrate with metallized vias, providing low parasitic inductance of the interconnections and low thermal resistance of the micro-module. **Methods.** Circuit-level simulation of electrical characteristics was performed using LTspice. The ceramic substrate layout was designed in Altium Designer. Electrical and thermal modeling were performed in the Ansys Electronics Desktop engineering analysis platform. The Q3D module was used to extract the parasitic inductances of the interconnects, and the Icepak module was employed to calculate the temperature distribution and determine the thermal resistance of the module. Experimental validation included double-pulse testing to evaluate switching overvoltages and peak currents, along with infrared thermography of the operating prototype. **Scientific Novelty.** A novel GaN-power-micromodule based on an AlN ceramic substrate with double-sided copper metallization and plated vias is proposed. The proposed design is characterized by reduced gate-loop and power-loop parasitic inductances of the GaN transistors, as well as lower thermal resistance of the micromodule. **Results.** The presented micromodule incorporates two independent channels, each providing a current of up to 7 A, and an operating voltage of at least 100 V. It is shown that for the proposed micromodule design, the inductance in the gate loop of both channels has a characteristic value of 2.6 nH and 2.2 nH, while the additional parasitic inductance in the power loop of the transistor does not exceed 0.5 nH. According to the simulation and experimental results, the transistor drain overvoltage did not exceed 20 V at a peak current of 125 A in the inductive load. The junction-to-ambient thermal resistance was verified by simulation and experimental results achieving 36 K/W. **Practical significance.** The proposed GaN power micromodule is intended for use in high-density low-voltage switched-mode DC/DC-converters operating at frequencies above 0.5 MHz, enabling an increase in their power density.

Keywords: power GaN-electronics, GaN-multichip micromodule, parasitic parameters extraction, DBC-ceramic substrate, metallized vias, low parasitic inductance, hybrid integration.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-2-179-188

References

1. He J., Cheng W.C., Wang Q., Cheng K., Yu H., Chai Y. Recent advances in GaN-based power HEMT devices. *Advanced Electronic Materials*, 2021, vol. 7, no. 4, pp. 2001045.
2. Islam N., Mohamed M.F.P., Khan M.F.A.J., Falina S., Kawarada H., Syamsul M. Reliability, applications and challenges of GaN-HEMT-technology for modern power devices: A review. *Crystals*, 2022, vol. 12, no. 11, pp. 1581.
3. Garg T., Kale S. Recent developments, reliability issues, challenges and applications of GaN-HEMT-technology. *IEEE Electron Devices Reviews*, 2024, vol. 1, pp. 16–30.
4. Udabe A., Baraia-Etxaburu I., Diez D.G. Gallium nitride power devices: A state of the art review. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 48628–48650.

5. Li S., Liu S., Tian Y., Zhang C., Wei J., Tao X., Li N., Zhang L., Sun W. High-temperature electrical performances and physics-based analysis of p-GaN-HEMT-device. *IET Power Electronics*, 2020, vol. 13, no. 3, pp. 420–425.
6. Hong K.B., Peng C.Y., Lin W.C., Chen K.L., Chen S.C., Kuo H.C., Chang E.Y., Lin C.H. Thermal analysis of flip-chip bonding designs for GaN-power-HEMTs with an on-chip heat-spreading layer. *Micromachines*, 2023, vol. 14, no. 3, pp. 519.
7. Rahman M.D., Akter T., Hasan A.S.M.K., Mantooth H.A., Song X. Design of Low Parasitic Inductance GaN-HEMT Flip-Chip Power Module. 2025 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Atlanta, GA, USA, IEEE, 2025, pp. 1844–1849.
8. Kong H., Yang F., Yang C., Zhang Y., Wang Z., Yao Y., Wang Y., Wang L. A highly integrated GaN power module with low parasitic inductance and high thermal performance. 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, IEEE, 2022, pp. 1–7.
9. Hou F., Guo X., Wang Q., Wang W., Lin T., Cao L., Zhang G.Q., Ferreira J.A. High power-density 3D-integrated power supply module based on panel-level PCB embedded technology. 2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), San Diego, CA, USA, IEEE, 2018, pp. 1365–1370.
10. Mrad R., Morand J., Perrin R., Mollov S. A PCB based package and 3D assembly for high power density converters. 2019 IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging (IWIPP), Toulouse, France, IEEE, 2019, pp. 73–77.
11. Lou Z., Mamee T., Hata K., Takamiya M., Nishizawa S.I., Saito W. IGBT power module design for suppressing gate voltage spike at digital gate control. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 6632–6640.
12. Yang Y., Dorn-Gomba L., Rodriguez R., Mak C., Emadi A. Automotive power module packaging: Current status and future trends. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 160126–160144.
13. Smirnov V.I., Khodakov A.M., Gavrikov A.A. [Modeling of thermoelectrical processes in a power MOSFET modules]. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, Vol. 15, no. 2, pp. 117–124 (in Russ.).
14. Marchesini J.L., Jeannin P.O., Avenas Y., Delaine J., Buttay C., Riva R. Implementation and switching behavior of a PCB-DBC IGBT module based on the power chip-on-chip 3D-concept. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, vol. 53, no. 1, pp. 362–370.
15. Choi A.Y., Jeon J., Lim J.H., Yoon S.W. Embedded PCB- and DBC-integrated design of 650 V GaN power modules with enhanced thermal and electrical performance. *Microelectronics Reliability*, 2026, vol. 179, pp. 116053.
16. Tian X., Jia N., DeVoto D., Paret P., Bai H., Tolbert L.M., Cui H. PCB-on-DBC GaN power module design with high-density integration and double-sided cooling. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, vol. 39, no. 1, pp. 507–516.
17. Morganti T. PCB Layout Rules for Converters and Motor Drives. Efficient Power Conversion. Available at: <https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/presentations/pcb-layout-rules-04292025.pdf> (accessed: 20 March 2026).
18. EPC2016C – eGaN FET DATASHEET. Efficient Power Conversion. Available at: https://epc-co.com/epc/portals/0/epc/documents/datasheets/EPC2016C_datasheet.pdf#page=1.00 (accessed: 20 March 2026).
19. Polyntsev E.S., Kodorova I.Y., Aksenov A.A., Kagadey V.A. 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), Altai, Russian Federation, IEEE, 2024, pp. 1180–1184.

20. Kodorova I.Y., Polyntsev E.S., Kagadey V.A. Thermal Analysis of Packaging Solution for GaN Multi-chip Power Micromodule. 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russian Federation, IEEE, 2024, pp. 1230–1233.

21. Gan C.L., Huang C.Y. Advanced flip chip packaging. *Interconnect Reliability in Advanced Memory Device Packaging*. Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 67–94.

22. Double pulse testing: The how, what and why / D. Levett, Z. Zheng, T. Frank. – Infineon Technologies, 2020, pp. 30–35. Available at: <https://ru.scribd.com/document/803783300/Infineon-Double-pulse-testing-Bodos-power-systems-Article-v01-00-EN> (accessed: 20 March 2026).

Egor S. Polyntsev

Postgraduate student, Department of Physical Electronics (PE), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-4368-8258
Phone: +7 (382-2) 41-48-61
Email: egoleo@mail.ru

Irina Y. Kodorova

Electronics Engineer JSC «Radar MMS» 28/3, V. Vysotsky Str., Tomsk, Russia, 634040
ORCID: 0009-0009-8521-8343
Phone: +7 (382-2) 61-40-00
Email: irina_tusur@mail.ru

Aleksandr I. Bartenev

Postgraduate student, Department of Industrial Electronics (IE), TUSUR 40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0009-0001-2082-9313
Phone: +7 (382-2) 41-48-61
Email: san4ubas@mail.ru

Andrey A. Aksenov

Postgraduate student, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 2/3, Akademicheskoy Ave., Tomsk, Russia, 634055
Phone: +7-905-990-57-14
Email: aksenov@mail.tsu.ru

Maxim S. Vorobyov

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher National Research Tomsk Polytechnic University 30, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-5136-5905
Phone: +7 (913) 886-95-37
Email: vormas@tpu.ru

Valery A. Kagadey

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Physical Electronics (PE), TUSUR 40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-48-61
Email: vak@mail.tsu.ru

Received: 29.04.2026.

Accepted: 07.09.2026.