

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОСТАВНЫХ ДВУХЪЯРУСНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ В ГИБРИДНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЕ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ СВЧ-ДИАПАЗОНА

В.А. Иовдальский

Н.В. Ганюшкина

А.И. Панас

teh.buro208@gmail.com

algan07@mail.ru

aipanas@istokmw.ru

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино, Московская обл.,  
Российская Федерация

---

### Аннотация

Показаны актуальность и перспективность применения в разработанной ранее гибридной интегральной схеме составных двухъярусных полевых транзисторов с барьером Шоттки на основе кристаллов GaN (нитрида галлия), а также возможности увеличения до 200 Вт рассеиваемой мощности при использовании одной пары кристаллов и до 250 Вт при использовании двух пар кристаллов. Приведены результаты тепловых расчетов, доказывающие перспективность применения предложенной конструкции гибридной интегральной схемы. Выполнено сравнение кристаллов двух видов — GaAs (арсенид галлия) и GaN. Эффективность и перспектива применения кристаллов GaN и составных двухъярусных полевых транзисторов с барьером Шоттки в гибридной интегральной схеме усилителей мощности СВЧ-диапазона позволяет существенно улучшить их массогабаритные характеристики. Применение полевых транзисторов с барьером Шоттки на основе кристаллов GaN мощностью до 100 Вт и более на время решило проблему увеличения мощности и улучшения массогабаритных характеристик усилителей СВЧ-диапазона. При сравнении максимальных температур кристалла транзистора при выделяющейся мощности 1 Вт выявлено, что повышение теплопроводности дополнительного теплоотвода способствует перемещению максимума температур с верхних кристаллов на нижние. Применение кристаллов GaN повышает уровень мощности усилителей во всем диапазоне

### Ключевые слова

*Составной двухъярусный полевой транзистор с барьером Шоттки, дополнительный теплоотвод, нитридгалиевый полевой транзистор с барьером Шоттки, усилитель мощности, температура, массогабаритные характеристики, гибридная интегральная схема*

теплопроводности материалов дополнительного теплоотвода (500...2000 Вт/(м · К)). Показано, что отношение мощностей с увеличением теплопроводности дополнительного теплоотвода примерно равно двум. Таким образом, доказана перспективность применения предлагаемой конструкции гибридной интегральной схемы усилителей мощности

Поступила 09.03.2023

Принята 20.03.2023

© Автор(ы), 2023

---

**Введение.** Ранее в России сложилась ситуация, когда закупка современных электронных компонентов за рубежом стала доступной и экономически выгодной. Это послужило основанием для широкого использования импортной комплектации в радиоэлектронных устройствах (РЭУ) различного назначения. Опыт отечественных специалистов в разработке конструкции гибридной интегральной схемы (ГИС) усилителей мощности не получил широкого распространения. Экономическая ситуация, сложившаяся в стране в 1990-е гг., привела к разрушению ряда организаций, разрабатывающих и производящих изделия микроэлектроники. В настоящее время ситуация резко изменилась. Против России введены жесткие санкции и на поставку современных электронных компонентов наложен запрет. Переход на электронные компоненты, производимые дружественными странами, не всегда возможен и не обеспечивает необходимые характеристики РЭУ. Ориентация на широкое использование импортной комплектации РЭУ различного назначения привела к серьезному отставанию в этой области.

Гибридные интегральные схемы по-прежнему остаются основным конструкторско-технологическим вариантом исполнения большинства РЭУ СВЧ-диапазона, так как именно они имеют универсальные свойства для создания и производства устройств широкого спектра. В связи с этим рядом отечественных предприятий на основе GaAs-технологии разрабатываются и производятся активные электронные компоненты, полевые транзисторы с барьером Шоттки (ПТШ) и монолитные интегральные схемы (МИС), используемые в качестве комплектующих компонентов РЭУ [1]. Однако параметры ПТШ и МИС, выпускаемых отечественными предприятиями, не соответствуют мировому уровню, что создает трудности разработчикам РЭУ.

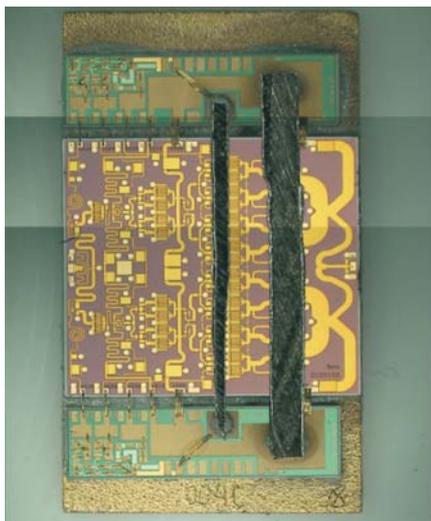
Изучая опыт зарубежных специалистов по совершенствованию конструкции ГИС, определили, что для улучшения характеристик усилителей мощности применяется двухъярусное расположение ПТШ в различных конструктивных вариантах ГИС. Используя зарубежный опыт, отечественные специалисты разработали несколько аналогичных конструкций ГИС. В настоящих условиях результаты разработок отечественных специалистов

в области ГИС СВЧ-диапазона, выполненных в 2005–2015 гг. [2–6], касающиеся суммирования мощности составных двухъярусных ПТШ на основе кристаллов GaAs в усилителях мощности СВЧ-диапазона, вновь становятся востребованными. Особенно это связано с резким увеличением мощности транзисторов, изготавливаемых на основе широкозонных полупроводниковых материалов.

**Развитие силовой электроники на основе широкозонных полупроводниковых материалов.** Сосредоточение части схемы РЭУ в полупроводниковых МИС СВЧ-диапазона приводит к улучшению их электрических и массогабаритных характеристик, поэтому использование МИС в качестве комплектующих элементов ГИС становится все более частым, особенно в РЭУ бортового аэрокосмического назначения.

Специалистами предприятия ЗАО «НПЦ «Алмаз–Фазотрон» (г. Саратов) в 2003 г. опубликованы материалы по разработке МИС усилителя мощности для использования в РЭУ ПТШ СВЧ-диапазона на основе кристаллов GaAs [1].

Позднее необходимость создания бортовой РЭУ аэрокосмического назначения привела к освоению технологии изготовления ПТШ и МИС СВЧ-диапазона на основе кристаллов GaAs рядом отечественных предприятий. Одним из таких предприятий является АО «НПП «Исток» им. Шокина», где освоено производство различных ПТШ и МИС, в том числе и 12-ваттных усилителей мощности, МИС которых приведена на рис. 1 [7, 8].



**Рис. 1.** Отечественная МИС 12-ваттного усилителя мощности на основе кристаллов GaAs в составе ГИС

Однако больших мощностей ПТШ на основе кристаллов GaAs и МИС СВЧ-диапазона добиться не удастся, хотя потребность в увеличении мощности очевидна.

Революционным направлением в развитии мощных компонентов СВЧ-диапазона стало применение широкозонных полупроводниковых материалов (карбида кремния (SiC), GaN и др.) и приборов на их основе. Это объясняется тем, что чем больше

ширина запрещенной зоны, тем выше допустимая рабочая температура и тем больше сдвинуты в коротковолновую область спектра рабочие диапазоны приборов, создаваемых на основе соответствующих полупроводниковых материалов. Например, максимальная рабочая температура для приборов на основе кристаллов GaN составляет 350...400 °С, для приборов на основе алмаза — 500...600 °С [8, 9].

Ширина запрещенной зоны хорошо коррелирует с температурой плавления материала. Значения этих параметров возрастают с увеличением энергии связи атомов в кристаллической решетке, поэтому для широкозонных полупроводниковых материалов характерны высокие температуры плавления, что создает определенные трудности на пути создания чистых и структурно-совершенных монокристаллов таких полупроводниковых материалов.

Подвижность носителей тока в значительной степени определяет частотные характеристики полупроводниковых приборов. Для создания приборов СВЧ-диапазона применяются полупроводниковые материалы, имеющие высокие значения подвижности носителей заряда и способные работать при высоких температурах и уровне радиации, что очень важно для РЭУ аэрокосмического назначения.

Следовательно, чем больше ширина запрещенной зоны, тем устойчивее работа СВЧ-транзистора при высоких температурах и больше плотность тока в сечении канала транзистора, что обуславливает высокий коэффициент его усиления. Чем больше максимальная критическая напряженность электрического поля применяемого полупроводникового материала, тем выше максимальное напряжение стока СВЧ-транзистора (50...100 В) и его пробивное напряжение (100...300 В), что увеличивает надежность и срок эксплуатации изделия. Транзисторы СВЧ-диапазона, выполненные по GaN-технологии, имеют высокую удельную мощность — до 10 Вт и более на 1 мм ширины затвора, что на порядок превышает удельную выходную мощность СВЧ-транзисторов, выполненных по GaAs-технологии [9, 10].

Высокая плотность мощности, выделяемой компонентами в изделиях аэрокосмического назначения, представляющих собой систему в корпусе, приводит к ужесточению требований по взаимному влиянию тепловыделяющих компонентов и их числу в корпусе, а также массогабаритных характеристик модулей, например, приемопередающих модулей активных фазированных антенных решеток (АФАР) [9, 10].

Так, применение СВЧ-транзисторов, выполненных по GaN-технологии, позволяет существенно уменьшить габаритные размеры и массу твер-

дотельного усилителя радиолокационной системы (РЛС), что важно для авиационных и космических применений, где необходима минимизация массы и габаритных размеров РЛС, в том числе и РЛС с АФАР. Например, вместо пяти GaAs-усилителей можно применить только один GaN-усилитель, обеспечивающий намного лучшие технические характеристики изделия в целом. Коэффициент теплопроводности кристаллов GaN в 8–10 раз больше, чем у кристаллов GaAs, что обеспечивает лучший и быстрый отвод теплоты от МИС и более высокую плотность мощности [8–12].

Военные и государственные программы позволили активно развивать и внедрять в жизнь GaN-технологии. Это такие известные программы, как американская WBGSTI, европейские MARCOS, TIGER, KORRIGQAN и японская NEDO. Первый серийный GaN-транзистор был произведен в 2001 г. В январе 2018 г. в Европе стартовала программа Project 5G-GaN 2-ECSEL / H2020 2017 (стоимость 26 млн евро), целью которой является разработка важнейших технологий для систем связи 5G и SATCOM. Судя по названию программы, для систем связи пятого поколения и систем спутниковой связи GaN-технология становится важнейшей, т. е. влияющей на развитие техники связи в целом. Программой руководит французская компания UMS, она же является и главным исполнителем, ей помогают 19 участников из восьми стран [8].

Техника СВЧ на основе GaN-полупроводников внедряется в разные области применения, но главным стимулом для укрепления рынка служит развертывание коммерческой инфраструктуры беспроводных радиосистем наряду с потребностями в РЛС военного назначения, систем радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и связи.

По результатам анализа развития рынка продукции СВЧ-диапазона на основе кристаллов GaN с долгосрочным использованием СВЧ-компонентов в 2017–2022 гг. отмечен рост дохода к концу 2022 г., с прогнозируемым преодолением уровня в 1 млрд долл. США.

Дальнейшие работы в этом направлении привели к тому, что компания Element Six (Великобритания) продолжила внедрение GaN-технологии на основе алмазов в производство продукции разного назначения — военного (РЛС, РЭБ) и гражданского (базовые станции сотовой связи, связные и метеорологические спутники), включая выпуск пластин на основе кристаллов GaN и алмаза для СВЧ-приборов [8, 13].

Таким образом, создание твердотельных транзисторов и усилителей на базе GaN-технологии открывает широкие перспективы для разработки новейших устройств и модернизации уже работающих изделий в важных частотных диапазонах.

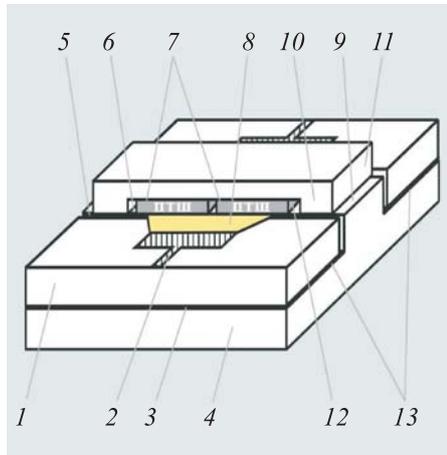
**Тепловые расчеты применения мощных кристаллов полупроводниковых приборов.** Реализовать в полной мере преимущества GaN-полупроводника в мощных СВЧ-приборах можно лишь при очень хорошем теплоотводе. Одно из направлений поиска решения этой задачи связано с использованием в качестве теплоотвода подложек из искусственного алмаза (CVD-алмаза), получаемого осаждением из газовой фазы. Теплопроводность таких подложек составляет 1000...2000 Вт/(м · К), что значительно превышает теплопроводность SiC (350...450 Вт/(м · К)), широко применяемого в настоящее время в производстве мощных СВЧ-приборов на основе кристаллов GaN. Расчеты показали, что при прямом контакте с алмазом температура в транзисторном канале может снизиться на 25...50 %. Попытки по формированию эпитаксиальных GaN-структур непосредственно на CVD-алмазе были предприняты еще в 1990-е гг.

Опыт зарубежных специалистов по тепловому анализу изучается, учитывается и используется отечественными разработчиками. Примером тому является настоящая работа. Разработка новых конструкций ГИС сопровождается их подробным тепловым анализом.

**Конструкторская часть.** Конструкция многокристального составного ПТШ, которая предполагает суммирование мощности четырех кристаллов транзисторов, приведена в [14, 15]. В конструкции использован принцип сложения мощности кристаллов ПТШ с балочными выводами, каждый вывод присоединяется к контактному площадкам сразу двух кристаллов. Затем эти пары кристаллов соединяются параллельно через балочные выводы, которые присоединяются к пленочным проводникам микрополосковой платы ГИС (рис. 2, 3).

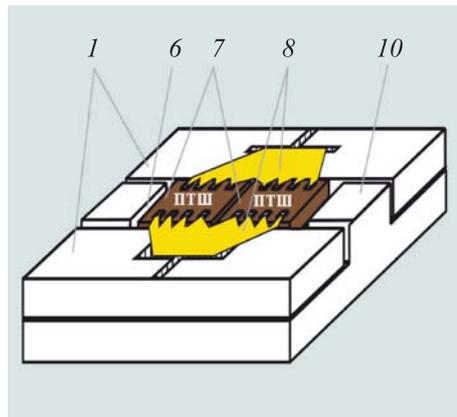
Отличительной особенностью конструкции является применение балочных выводов, которые предназначены для присоединения по меньшей мере двух кристаллов ПТШ [16, 17]. Такое присоединение предполагает установку кристаллов на строго определенном месте и с фиксированным расстоянием между ними. Это позволяет сократить длину внутрисхемных соединительных проводников и тем самым улучшить электрические характеристики ГИС благодаря уменьшению паразитной индуктивности [17, 18]. Близкое расположение четырех кристаллов вызывает их тепловое влияние друг на друга, поскольку при их работе выделяется теплота. Анализ такого взаимодействия представляет определенный интерес для разработчиков ГИС.

**Разработка тепловой модели ГИС.** Аналогичная работа проводилась для ГИС с двумя кристаллами, соединенными параллельно через балочные

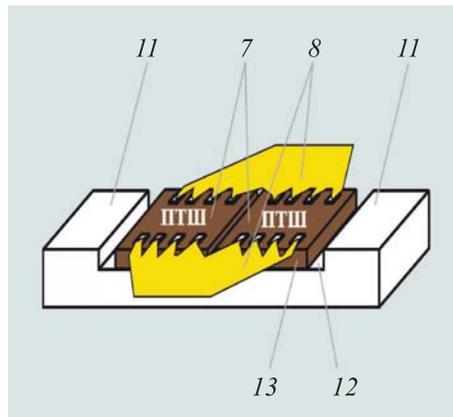


**Рис. 2.** Фрагмент мощной ГИС СВЧ-диапазона:

1 — диэлектрическая подложка; 2 — топологический рисунок металлизации; 3 — экранная заземляющая металлизация; 4 — металлическое теплоотводящее основание; 5 — отверстие в диэлектрической подложке; 6 — выемка в металлическом основании; 7 — кристаллы транзисторов; 8 — плоские балочные выводы кристаллов транзисторов; 9 — выступ на металлическом теплоотводящем основании; 10 — монтажные площадки; 11 — электро- и теплопроводящая металлическая пластина для дополнительного теплоотвода (ДТ); 12 — выемка; 13 — электро- и теплопроводящее связующее вещество



*а*



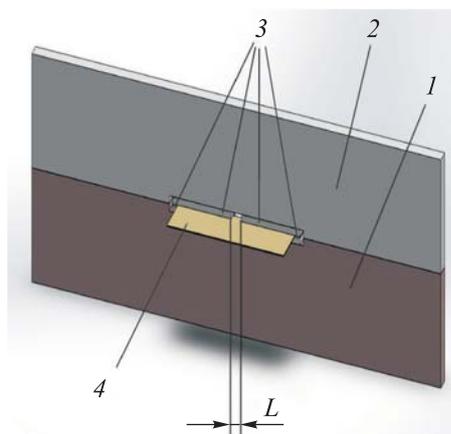
*б*

**Рис. 3.** Составные части фрагмента мощной ГИС СВЧ-диапазона (обозначения позиций см. рис. 2)

выводы с интегральным теплоотводом [15]. Предлагаемую конструкцию можно рассмотреть как модель, в которой есть две пары двухъярусных (расположенных один над другим) транзисторов 3 (рис. 4). Области тепловыделения кристаллов в паре обращены друг к другу. Нижние транзисторы контактируют с основанием 1 из композиционного материала MD-50, а верхние — с металлической хорошо электро- и теплопроводящей пластиной 2, материал которой варьировался в широком диапазоне изменения коэффициента теплопроводности ( $\lambda = 250 \dots 2000 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ). Между собой транзисторы имеют контакт через золотые балочные выводы 4.

**Рис. 4.** Общий вид модели фрагмента (половины) конструкции:

- 1 — основание;
- 2 — электро- и теплопроводящая пластина для ДТ;
- 3 — кристаллы транзисторов;
- 4 — золотой балочный вывод;  $L$  — горизонтальное расстояние между парами транзисторов



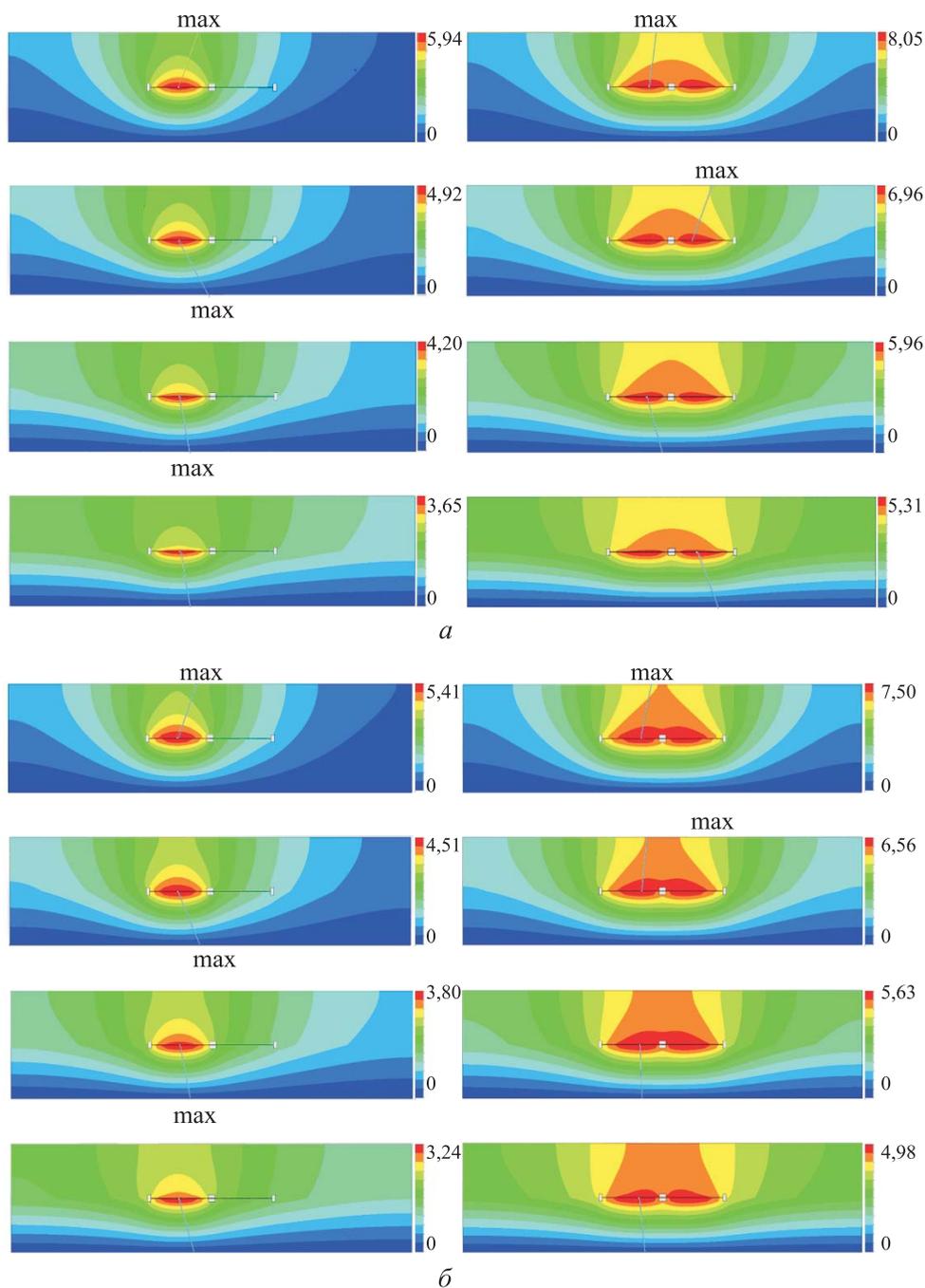
**Постановка задачи и результаты исследования.** Для определения температурных полей использована вычислительная программа, осуществляющая решение дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных элементов. В данной постановке рассматривалась трехмерная стационарная задача, описываемая уравнением

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0,$$

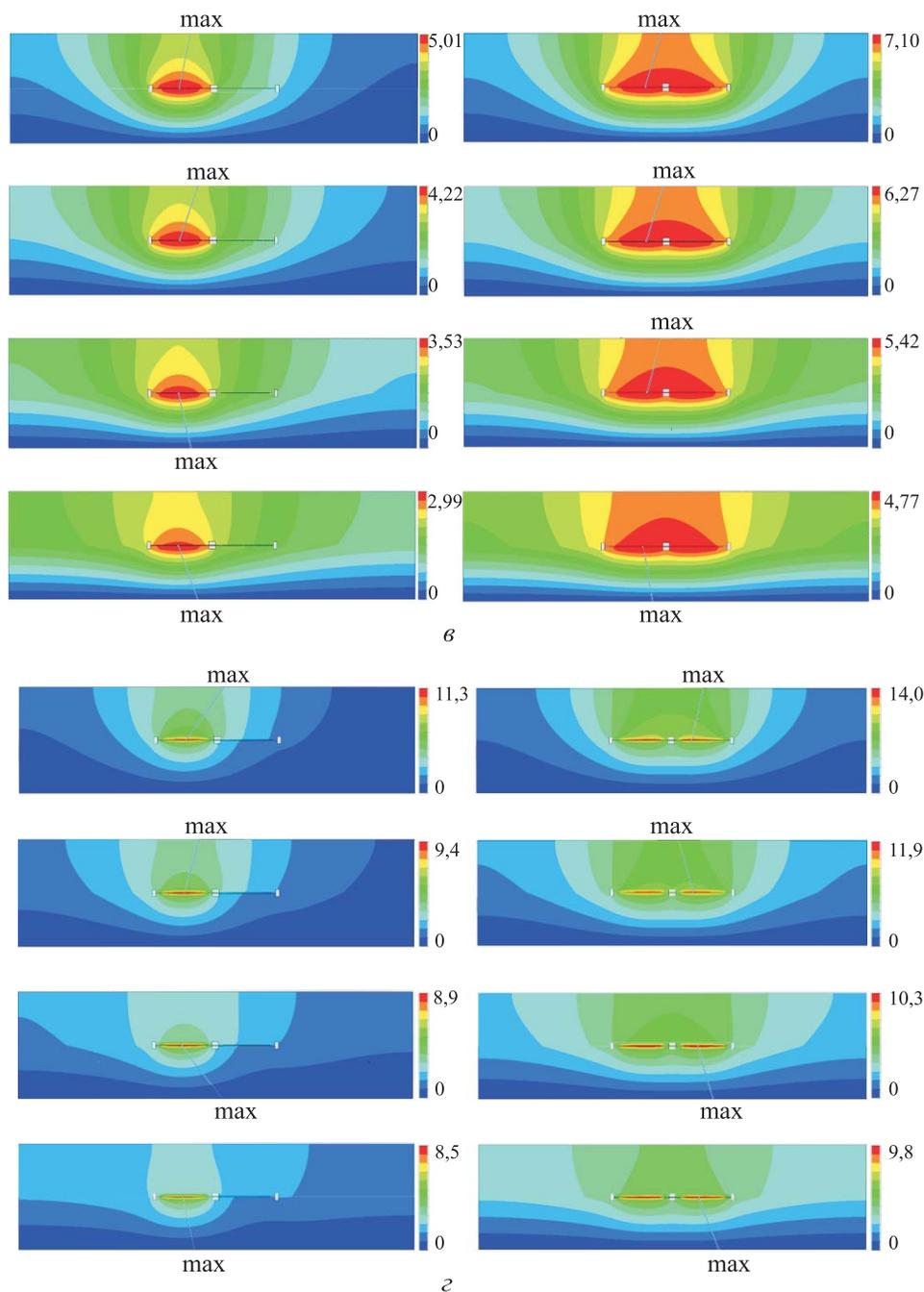
с граничными условиями: нижняя поверхность основания имеет постоянную температуру ( $t = 0$ ); на поверхностях транзисторов выделяется тепловая мощность  $Q$  (плотность теплового потока  $q = -\lambda (dt/dn)$ , где  $n$  — нормаль к поверхности). Остальные поверхности конструкции находятся в условиях теплоизоляции.

Численное исследование проводилось для горизонтального расстояния  $L = 0,2$  мм между парами транзисторов [14]. В качестве кристалла принята двухслойная структура, состоящая из кристаллов GaN толщиной 1 мкм с теплопроводностью 130 Вт/(м · К) и алмаза толщиной 100 мкм [8] с тремя вариантами теплопроводности: 500, 1000 и 2000 Вт/(м · К), в качестве материала ДТ — композиционный материал MD-50 с теплопроводностью 250 Вт/(м · К) и алмаз (такого же диапазона теплопроводности, как у кристалла).

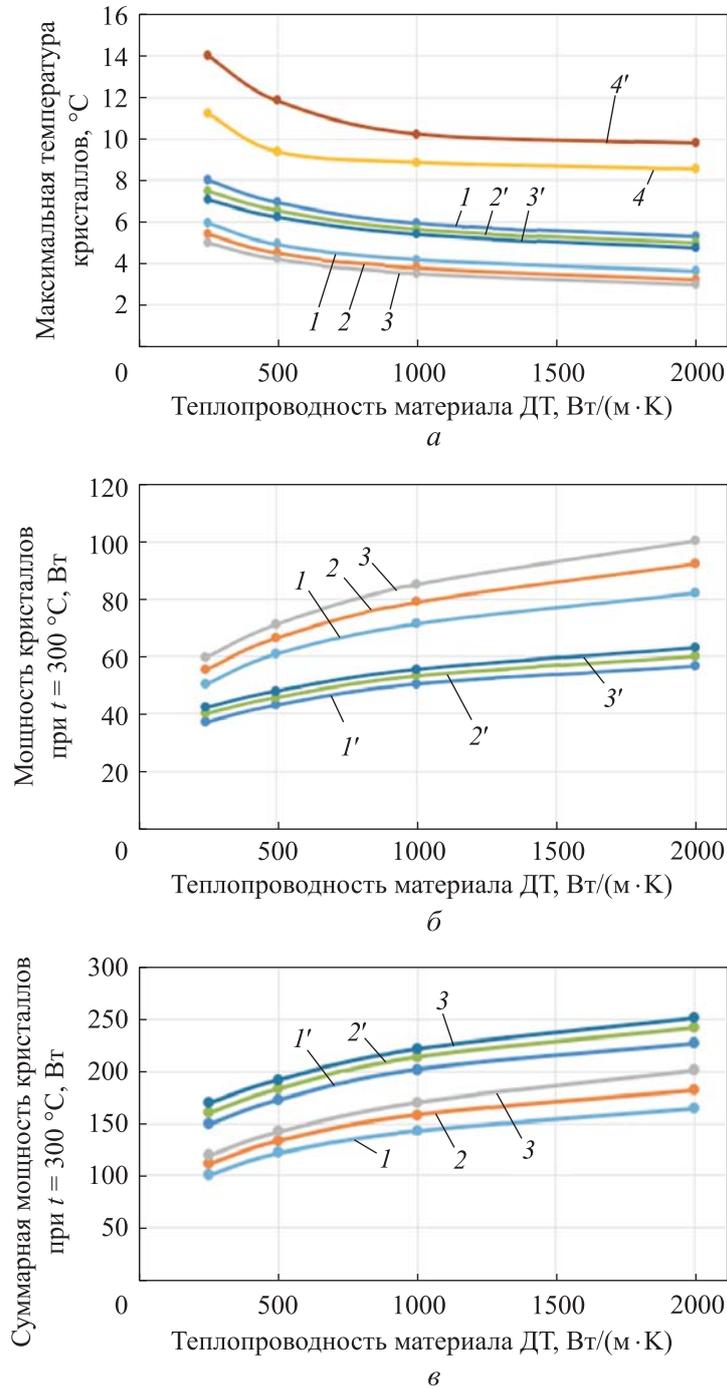
**Анализ результатов исследования.** Для наглядности результатов исследования (рис. 5, 6, таблица) минимальный уровень температур устройства, приходящийся на нижнюю поверхность основания, выбран равным нулю. Эта точка отсчета позволяет интерпретировать все рассчитанные температуры любой точки конструкции как температурные перепады относительно нижней поверхности основания.



**Рис. 5 (начало).** Тепловые поля в вертикальном продольном срединном сечении конструкции, возникающие при выделении мощности  $Q = 1$  Вт с каждого кристалла (одна пара кристаллов — левый столбец, две пары — правый столбец):  
*a, б* — кристаллы GaN и алмаз (двухслойная структура) с теплопроводностью 500, 1000 Вт/(м · К)



**Рис. 5 (окончание).** Тепловые поля в вертикальном продольном срединном сечении конструкции, возникающие при выделении мощности  $Q = 1$  Вт с каждого кристалла (одна пара кристаллов — левый столбец, две пары — правый столбец):  
 v — кристаллы GaN и алмаз (двухслойная структура) с теплопроводностью  $2000 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ; z — кристаллы GaAs с теплопроводностью  $20 \dots 45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  
 max — максимальная температура



**Рис. 6.** Зависимости температуры кристаллов транзисторов (а), мощности кристаллов (б) и суммарной мощности кристаллов (в) при  $t = 300$  °С от теплопроводности материала ДТ:

1 (1')–3 (3') — 500, 1000, 2000 (Вт/(м·К)) соответственно (для одной (двух) пар кристаллов GaN); 4 и 4' — для одной и двух пар кристаллов GaAs

**Температурные и мощностные характеристики кристаллов транзисторов**

Теплопроводность материала ДТ, Вт/(м · К)	Число пар кристаллов / Материал кристаллов							
	1/C-500, GaN	1/C-1000, GaN	1/C-2000, GaN	1/GaAs	2/C-500, GaN	2/C-1000, GaN	2/C-2000, GaN	2/GaAs
<i>Максимальная температура кристалла транзистора при выделяющейся мощности 1 Вт</i>								
250	5,94	5,41	5,01	11,25	8,05	7,50	7,10	14,04
500	4,92	4,51	4,22	9,39	6,96	6,56	6,27	11,86
1000	4,20	3,80	3,53	8,87	5,96	5,63	5,42	10,25
2000	3,65	3,24	2,99	8,54	5,31	4,98	4,77	9,80
<i>Максимальная мощность кристалла (при работе одной и двух пар кристаллов) при максимальной температуре не более 300 °С</i>								
250	50,5	55,5	59,8	—	37,27	40,03	42,2	—
500	61	66,5	71,2	—	43,1	45,7	47,9	—
1000	71,5	79	85	—	50,4	53,3	55,4	—
2000	82,3	92,5	100,3	—	56,6	60,3	62,9	—
<i>Максимальная суммарная мощность всех кристаллов (при работе одной и двух пар кристаллов) при максимальной температуре 300 °С</i>								
250	101	111	119,7	—	149,1	160,1	169	—
500	122	133	142	—	172,4	183	191,5	—
1000	143,1	158	170	—	201,5	213,3	221,4	—
2000	164,6	181,5	200,7	—	226,2	241,2	251,5	—

Исследовали также влияние температурных полей соседних групп транзисторов друг на друга в зависимости от числа работающих пар (одной или двух), что привело к изменению максимальных температур на кристаллах.

Поскольку при мощности 1 Вт наблюдали весьма незначительные изменения результатов, то при проведении исследований точность численного расчета температур для выявления закономерностей выбирали достаточно высокой (до сотых долей градусов). Это позволило определить характер поведения температурных кривых.

Тепловые поля в вертикальном продольном срединном сечении конструкции, возникающие при выделении мощности  $Q = 1$  Вт с каждого кристалла для одной и двух пар кристаллов транзисторов, приведены на рис. 5. Теплопроводность материала ДТ составляет соответственно 250, 500, 1000, 2000 Вт/(м · К) (см. сверху вниз на рис. 5, *a–z*); материал выполнен на основе кристаллов GaN и алмаза, а также кристаллов GaAs. Увеличение теплопроводности материала ДТ улучшает его теплорастекание, что способствует перемещению максимума температур с верхних кристаллов на нижние. Для двух пар кристаллов (см. рис. 5, *a, б, z*) это происходит при теплопроводности более 500 Вт/(м · К), для кристаллов, приведенных на рис. 5, *в*, — при теплопроводности материала ДТ более 1000 Вт/(м · К). В этих случаях верхний кристалл конструкции начинает охлаждать нижний.

Отметим (см. таблицу и рис. 6, *a*), что при работе двух пар кристаллов транзисторов уровень температур примерно в 1,2 раза выше, чем при работе одной пары кристаллов транзисторов. Такое различие связано с тем, что при  $L = 0,2$  мм происходит температурное взаимовлияние соседних пар кристаллов, они подогревают друг друга. Однако даже при таких условиях GaAs-транзисторы имеют уровни температур в 1,9–2,24 раза выше относительно GaN-транзисторов, что объясняется низкой теплопроводностью кристаллов GaAs.

Разность максимальных температур кристаллов GaAs и GaN при увеличении теплопроводности материала ДТ видна на рис. 6, *a*. У кристаллов GaAs скорость уменьшения температуры существенна для теплопроводности 250, 500, 1000 Вт/(м · К). При этом максимальная температура снижается с 14,04 до 10,25 °С. Дальнейшее увеличение теплопроводности (от 1000 до 2000 Вт/(м · К)) незначительно влияет на уменьшение температур от 10,25 до 9,8 °С (кривые 4 и 4', см. рис. 6, *a*). Влияние кристаллов GaN более сглажено — при увеличении теплопроводности материала ДТ уровень максимальных температур всегда снижается, хотя уменьшение эффекта можно наблюдать и при больших теплопроводностях.

Результаты расчета мощности, которую может выдержать кристалл, имеющий максимальную температуру 300 °С, приведены на рис. 6, б и в таблице. Сравниваются три варианта ГИС с кристаллами и различные материалы ДТ, что обусловлено невозможностью работы кристаллов GaAs при таких высоких температурах. Мощность одной пары кристаллов GaN транзисторов варьируется от 50,5 до 100,3 Вт/кристалл. Отметим, что кристаллы GaN продолжают активно повышать уровень мощности во всем диапазоне материалов ДТ (см. рис. 6, б и таблицу).

Суммарная мощность группы кристаллов GaN транзисторов, имеющих максимальную температуру, не превышающую 300 °С, приведена в зависимости от теплопроводности материала ДТ (см. таблицу и рис. 6, в). С ростом теплопроводности значение отношения мощностей для одной пары кристаллов GaN составляет 101...200,7 Вт, т. е. увеличивается в 1,99 раза; для двух пар кристаллов GaN увеличивается в 1,7 раза и составляет 149,1...251,5 Вт.

**Заключение.** Эффективность и перспективность применения кристаллов GaAs и составных двухъярусных ПТШ в ГИС усилителей мощности СВЧ-диапазона доказана ранее и позволяет существенно улучшить их массогабаритные характеристики. Появление и применение ПТШ на основе кристаллов GaN мощностью до 100 Вт и более на время решило проблему увеличения мощности и улучшения массогабаритных характеристик усилителей СВЧ-диапазона. Результаты, полученные в настоящей работе, показывают перспективность применения в разработанной конструкции ГИС на основе кристаллов GaN составных двухъярусных ПТШ и возможности увеличения рассеиваемой мощности до 200 Вт при использовании одной пары кристаллов GaN составных ПТШ и до 250 Вт при использовании двух пар.

При сравнении максимальных температур кристаллов транзистора и выделяющейся мощности 1 Вт выявлено, что кристаллы GaAs имеют уровни температур в 1,9–2,24 раза выше, чем кристаллы GaN, что свидетельствует о лучшем температурном режиме конструкции с применением кристаллов GaN.

Увеличение теплопроводности материала ДТ улучшает его теплоотведение, что способствует перемещению максимума температур с верхних кристаллов на нижние и соответственно изменению направления теплового потока.

Применение кристаллов GaN повышает уровень мощности во всем диапазоне теплопроводности материалов ДТ. С повышением теплопро-

водности материалов ДТ значение отношения мощностей также увеличивается: в ~ 2 раза для одной пары кристаллов ПТШ, в 1,7 раза для двух пар кристаллов.

Полученные результаты показывают перспективность применения данной конструкции ГИС на основе составных двухъярусных ПТШ и могут быть использованы отечественными разработчиками РЭУ.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Санников Е.С., Кобякин В.П., Елисеев В.А. и др. Монолитный двухваттный усилитель мощности X-диапазона частот. *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*, 2003, № 1, с. 103–104.
- [2] Иовдальский В.А., Пчелин В.А., Лапин В.Г. и др. Мощная гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона. Патент РФ 2298255. Заявл. 12.08.2005, опубл. 27.04.2007.
- [3] Иовдальский В.А., Пчелин В.А. Выводная рамка для СВЧ и КВЧ полупроводникового прибора. Патент РФ 2191492. Заявл. 17.04.2000, опубл. 20.10.2002.
- [4] Иовдальский В.А. Новая концепция сложения мощности кристаллов ПТШ в ГИС усилителей мощности СВЧ-диапазона. *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*, 2006, № 1, с. 44–51.
- [5] Иовдальский В.А., Лапин В.Г., Пчелин В.А. Двухъярусная транзисторная сборка для усилителей мощности СВЧ-диапазона. *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*, 2009, № 4, с. 38–41.
- [6] Иовдальский В.А., Пчелин В.А., Лапин В.Г. Составной двухъярусный транзистор для усилителей мощности СВЧ-диапазона. *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*, 2010, № 4, с. 65–71.
- [7] Заднепряная Н.И. Разработка и освоение серийного производства двух литер сверхвысокочастотных усилителей мощности с полосами не более 1 октавы в диапазоне частот 8–12 ГГц с выходной мощностью 4 и 12 Вт с повышенным коэффициентом полезного действия до 35 %. М., Исток, 2018.
- [8] Иовдальский В.А., Пчелин В.А., Гаврилов И.А. Твердотельные усилители мощности СВЧ-диапазона. М., Курс, 2020.
- [9] Борисов А.А., ред. Приемопередающие модули АФАР СВЧ-диапазона. М., Курс, 2022.
- [10] Данилин Н.С., Булаев И.Ю., Бражников М.А. и др. Модернизация космической электронной инфраструктуры на основе альянса систем частного применения кристаллов в корпусе. *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*, 2015, № 4, с. 41–49.
- [11] Далингер А.Г., Мальщик В.М., Иовдальский В.А. Совершенствование структуры приемопередающего модуля АФАР СВЧ-диапазона. *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*, 2017, № 2, с. 75–83.

- [12] Борисов А.А., Буробин В.А. Обзор современных технологий гетероинтеграции многокомпонентных полупроводниковых соединений АЗВ5 и кремниевых КМОП для внедрения на рынки оборонной и гражданской продукции. М., Техносфера, 2020.
- [13] Strategy analytics reports defense, 5G to propel RF GaN market past \$ 1 B. *Microwave J.*, August 1, 2018. URL: <https://www.microwavejournal.com/articles/30821-strategy-analytics-reports-defense-5g-to-propel-rf-gan-market-past-1b>
- [14] Иовдальский В.А., Ганюшкина Н.В., Моргунов В.Г. и др. Тепловой анализ работы мощной ГИС с интегральным теплоотводом от кристаллов полупроводниковых приборов. *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*, 2012, № 2, с. 57–74.
- [15] Иовдальский В.А., Пчелин В.А., Герасименко С.В. Эффективность применения двухкристалльных составных ПТШ в усилителе мощности СВЧ-диапазона. *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*, 2014, № 2, с. 33–38.
- [16] Иовдальский В.А., Манченко Л.В., Давронов С.К. Совершенствование геометрии плоских выводов кристаллов компонентов ГИС СВЧ-диапазона. *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*, 2015, № 4, с. 67–70.
- [17] Иовдальский В.А., Дудинов К.В., Давронов С.К. Выводная рамка для многокристалльного полупроводникового прибора СВЧ. *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*, 2015, № 4, с. 70–73.
- [18] Иовдальский В.А., Лапин В.Г., Пчелин В.А. и др. Многокристалльный составной ПТШ для ГИС усилителей мощности СВЧ-диапазона. *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*, 2015, № 4, с. 74–76.

**Иовдальский Виктор Анатольевич** — д-р техн. наук, доцент, начальник лаборатории отдела качества АО «НПП «Исток» им. Шокина» (Российская Федерация, 141190, Московская обл., г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2а, корп. 1).

**Ганюшкина Нина Валентиновна** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник теоретического отдела АО «НПП «Исток им. Шокина» (Российская Федерация, 141190, Московская обл., г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2а, корп. 1).

**Панас Андрей Иванович** — д-р физ.-мат. наук, профессор, заместитель директора по научной работе АО «НПП «Исток» им. Шокина» (Российская Федерация, 141190, Московская обл., г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2а, корп. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Иовдальский В.А., Ганюшкина Н.В., Панас А.И. Перспективы применения составных двухъярусных полевых транзисторов с барьером Шоттки в гибридной интегральной схеме усилителей мощности СВЧ-диапазона. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2023, № 2 (143), с. 20–38.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-2-20-38>

**PROSPECTS OF USING THE SCHOTTKY-BARRIER  
COMPOSITE TWO-TIER FETS IN A HIC  
OF THE MICROWAVE POWER AMPLIFIERS**

V.A. Iovdalskiy  
N.V. Ganyushkina  
A.I. Panas

teh.buro208@gmail.com  
algan07@mail.ru  
aipanas@istokmw.ru

**JSC “NPP “Istok” im. Shokina”, Fryazino, Moscow Region, Russian Federation**

---

**Abstract**

The paper demonstrates relevance and prospects of using the Schottky-barrier composite two-tier FETs based on the GaN crystals in the previously developed hybrid integrated circuit design, as well as the possibility to increase power dissipation up to 200 W with using one pair of crystals and to 250 W with using the two pairs. Thermal calculation results are presented proving the prospects of using the proposed hybrid integrated circuit design. Crystals of the two types GaAs and GaN are compared. Efficiency and prospects for using GaN crystals and Schottky barrier composite two-tier field-effect transistors in a hybrid integrated circuit of the microwave power amplifier could significantly improve its weight and size characteristics. Advent and use of the Schottky-barrier field-effect transistors based on the GaN crystals with the power of up to 100 W and more was temporarily solving the problem of increasing the power and improving the weight and size characteristics of the microwave amplifiers. When comparing maximum temperatures on the transistor crystal at the released power of 1 W, it was found that an increase in the thermal conductivity of the additional heat sink contributed to maximum temperature displacement from the upper crystals to the lowers and changed the heat flow direction. GaN crystals use increased the power level over the entire range of thermal conductivity of the additional heat sink materials 500–2000 W/(m · K), and the power ratio with an increase in the thermal conductivity of the additional heat sink was approximately equal to two. Prospects of using the proposed design of a hybrid integrated circuit of power amplifiers was justified

**Keywords**

*Schottky-barrier composite two-tier field-effect transistor, additional heat sink, Schottky-barrier gallium nitride field-effect transistor, power amplifier, temperature, weight and size characteristics, hybrid integrated circuit*

Received 09.03.2023

Accepted 20.03.2023

© Author(s), 2023

## REFERENCES

- [1] Sannikov E.S., Kobyakin V.P., Eliseev V.A., et al. Monolithic two-watt X-band power amplifier. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 2003, no. 1, pp. 103–104 (in Russ.).
- [2] Iovdalskiy V.A., Pchelin V.A., Lapin V.G., et al. Moshchnaya gibridnaya integralnaya skhema SVCh-diapazona [High-power hybrid microwave integrated circuit]. Patent RU 2298255. Appl. 12.08.2005, publ. 27.04.2007 (in Russ.).
- [3] Iovdalskiy V.A., Pchelin V.A. Vyvodnaya ramka dlya SVCh i KVCh poluprovodnikovogo pribora [Terminal strip for microwave and extremely-high frequency semiconductor devices]. Patent RU 2191492. Appl. 17.04.2000, publ. 20.10.2002 (in Russ.).
- [4] Iovdalskiy V.A. A new concept for crystal PTS power stacking in GIS microwave power amplifiers. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 2006, no. 1, pp. 44–51 (in Russ.).
- [5] Iovdalskiy V.A., Lapin V.G., Pchelin V.A. Double-level transistor assembling for microwave power amplifiers. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 2009, no. 4, pp. 38–41 (in Russ.).
- [6] Iovdalskiy V.A., Pchelin V.A., Lapin V.G. A composed double-deck transistor for microwave power amplifiers. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 2010, no. 4, pp. 65–71 (in Russ.).
- [7] Zadnepryanaya N.I. Razrabotka i osvoenie seriynogo proizvodstva dvukh liter sverkhvysokochastotnykh usiliteley moshchnosti s polosami ne bolee 1 oktavy v diapazone chastot 8–12 GGts s vykhodnoy moshchnostyu 4 i 12 Vt s povyshennym koefitsientom poleznogo deystviya do 35 % [Development and mastering of serial production of two liters of ultra-high-frequency power amplifiers with bands not exceeding 1 octave in frequency range 8–12 GHz with output power of 4 and 12 W and increased efficiency up to 35 %]. Moscow, Istok Publ., 2018.
- [8] Iovdalskiy V.A., Pchelin V.A., Gavrilov I.A. Tverdotelnye usiliteli moshchnosti SVCh-diapazona [Solid-state microwave power amplifiers]. Moscow, Kurs Publ., 2020.
- [9] Borisov A.A., ed. Priemoperedayushchie moduli AFAR SVCh-diapazona [Microwave ADF transceiver modules]. Moscow, Kurs Publ., 2022.
- [10] Danilin N.S., Bulaev I.Yu., Brazhnikov M.A., et al. Modernization of space electron infrastructure based on alliance of the customized application systems of the chips in the package. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 2015, no. 4, pp. 41–49 (in Russ.).
- [11] Dalinger A.G., Malyshchik V.M., Iovdalskiy V.A. Upgrading the structure of microwave active phased array transmitter-receiver module. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 2017, no. 2, pp. 75–83 (in Russ.).
- [12] Borisov A.A., Burobin V.A. Obzor sovremennykh tekhnologiy geterointegratsii mnogokomponentnykh poluprovodnikovyykh soedineniy A3V5 i kremnievykh KMOP dlya vnedreniya na rynki oboronnoy i grazhdanskoy produktsii [Review of modern

technologies of multicomponent AlGaN and silicon CMOS semiconductors heterointegration for implementation in defense and civil markets]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2020.

[13] Strategy analytics reports defense, 5G to propel RF GaN market past \$ 1 B. *Microwave J.*, August 1, 2018. Available at: <https://www.microwavejournal.com/articles/30821-strategy-analytics-reports-defense-5g-to-propel-rf-gan-market-past-1b>

[14] Iovdalskiy V.A., Ganyushkina N.V., Morgunov V.G., et al. The thermal analysis of work of a power hic with integrated heat sink from the chips of semiconductor devices. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 2012, no. 2, pp. 57–74 (in Russ.).

[15] Iovdalskiy V.A., Pchelin V.A., Gerasimenko S.V. The efficiency of using two-chip composite field-effect Schottky transistors in microwave range power amplifier. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 2014, no. 2, pp. 33–38 (in Russ.).

[16] Iovdalskiy V.A., Manchenko L.V., Davronov S.K. The improvement of flat leads geometry of microwave hic component chips. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 2015, no. 4, pp. 67–70 (in Russ.).

[17] Iovdalskiy V.A., Dudinov K.V., Davronov S.K. A lead frame for a microwave multichip semiconductor device. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 2015, no. 4, pp. 70–73 (in Russ.).

[18] Iovdalskiy V.A., Lapin V.G., Pchelin V.A., et al. Multichip composite Schottky-gate FET for microwave hic power amplifiers. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 2015, no. 4, pp. 74–76 (in Russ.).

**Iovdalskiy V.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Head of the Laboratory of the Quality Department, JSC “NPP “Istok” im. Shokina” (Vokzalnaya ul. 2a, korp. 1, Fryazino, Moscow Region, 141190 Russian Federation).

**Ganyushkina N.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Theoretical Department, JSC “NPP “Istok” im. Shokina” (Vokzalnaya ul. 2a, korp. 1, Fryazino, Moscow Region, 141190 Russian Federation).

**Panas A.I.** — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Deputy Director for Research, JSC “NPP “Istok” im. Shokina” (Vokzalnaya ul. 2a, korp. 1, Fryazino, Moscow Region, 141190 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Iovdalskiy V.A., Ganyushkina N.A., Panas A.I. Prospects of using the Schottky-barrier composite two-tier FETs in a HIC of the microwave power amplifiers. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 2 (143), pp. 20–38 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-2-20-38>