

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.382

О ПРОБЛЕМЕ СОЗДАНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МОЩНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ АЛМАЗА

© 2014 г. Г. З. Гарбер¹, А. А. Дорофеев¹, А. М. Зубков¹, Ю. В. Колковский¹, Ю. А. Концевой¹, К. Н. Зяблюк², **А. Ю. Митягин**, Н. Х. Талипов², Г. В. Чучева²

¹ФГУП “НПП “Пульсар”,

Российская Федерация, 105187 Москва, Окружной проезд, 27

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,

Российская Федерация, 141196 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 21.02.2013 г.

На основе численных экспериментов намечены пути создания сверхвысокочастотных полевых транзисторов на основе алмаза с отдаваемой мощностью более 2.5 Вт на 1 мм ширины затвора на частоте 15 ГГц. Рассчитано семейство вольт-амперных характеристик полевого транзистора с барьером Шоттки, имеющего длину затвора $L_G = 50$ нм и ширину $W = 1$ мм. По аналогии с НЕМТ на GaN, например типа TGF2023-20, построена топология мощного алмазного транзистора в виде параллельно включенных ячеек, каждая из которых имеет ширину затвора $W = 1.2$ мм, количество элементарных затворов в ячейке равно 24.

DOI: 10.7868/S003384941403005X

ВВЕДЕНИЕ

Уникальное сочетание сверхвысокой теплопроводности, высокой скорости дрейфа носителей тока, высокой пробивной напряженности электрического поля и сравнительно низкой диэлектрической проницаемости при высоком удельном сопротивлении нелегированного материала делают алмаз перспективным материалом для мощных СВЧ-приборов [1, 2]. В связи с разработкой технологии выращивания пластин алмаза научный интерес к алмазным транзисторам перешел в практическую плоскость. Применение алмазных структур для приема-передающих модулей перспективной радиоэлектронной (РЭ) аппаратуры позволит: 1) обеспечить замещение импортных аналогов (не менее 30%), 2) увеличить технический ресурс аппаратуры, 3) повысить технические и надежность характеристики РЭ при улучшении массогабаритных показателей передающей аппаратуры, 4) снизить себестоимость СВЧ аппаратуры на 15...30%. Поэтому развитие технологий использования алмазных материалов в СВЧ-технике является актуальным и современным направлением.

Цель данной работы – проектирование мощных p -канальных СВЧ полевых транзисторов с максимальной частотой генерирования >50 ГГц и рабочей частотой 15 ГГц. Выбор p -канальных транзисторов объясняется тем, что бор в качестве акцепторной примеси вносит уровни, наиболее

близко расположенные к границе запрещенной зоны. При δ -легировании бором практически вся акцепторная примесь оказывается активированной [3].

1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ МОЩНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ АЛМАЗА

Мощный полевой СВЧ-транзистор проектировали с помощью ЭВМ по ранее разработанной методике [4]. При проектировании транзистора проводилось двумерное квазигидродинамическое моделирование его активной области [5, 6]. Использовалась модель n -канального транзистора, но в качестве параметров материала использовались параметры дырок в алмазе. Таким образом, получалась модель “инвертированного” транзистора, эквивалентного p -канальному с точностью до знака напряжений смещений затвора и стока.

Основные этапы проектирования:

- 1) выбор структуры транзистора;
- 2) выбор топологии кристалла транзистора;
- 3) моделирование работы активной области транзистора по опубликованной методике и программам [5, 6];
- 4) построение нелинейной эквивалентной схемы кристаллов по методике и программам, описанной в работе [4];

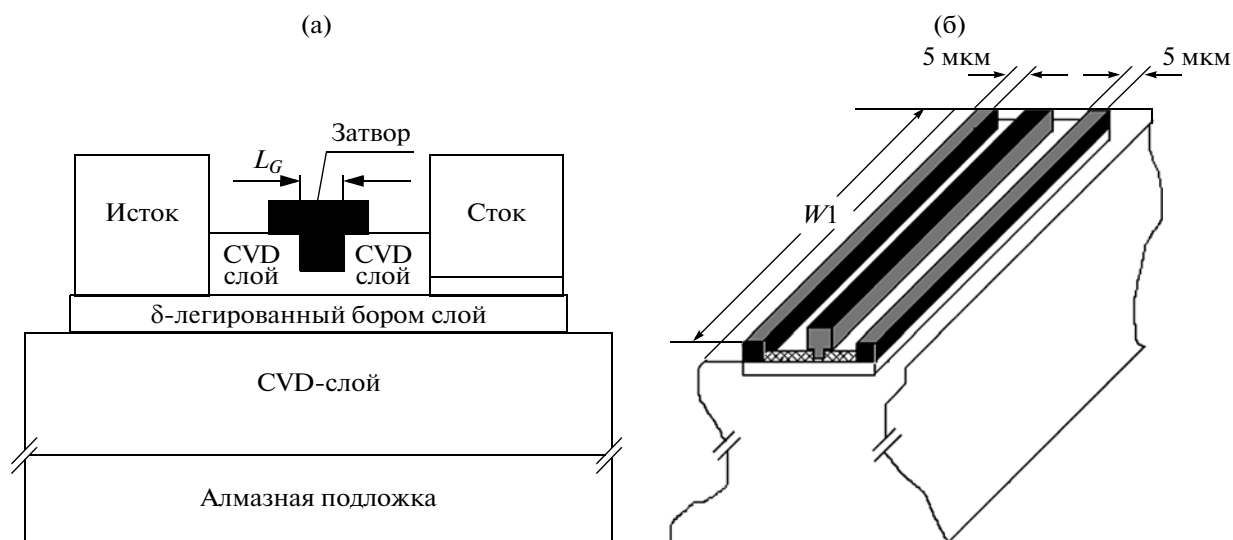


Рис. 1. Поперечный разрез транзистора (а) и фрагмент гребенчатой структуры (б).

- 5) выбор типа электрической интегральной схемы (ИС) для измерения параметров транзистора;
- 6) структурный и параметрический синтез СВЧ ИС с помощью САПР MICROWAVE OFFICE;
- 7) электромагнитное моделирование средствами САПР SONNET SUITE и корректировка топологии транзистора;
- 8) разработка исходной информации для конструкторской документации.

При проектировании ориентировались на следующие технологические нормы:

- а) использована структура алмаза [1], состоящая из подзатворного нелегированного CVD-слоя толщиной 10...30 нм; δ-легированного бором слоя на CVD-алмазе с поверхностной концентрацией $(1...10) \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$; подложки изолирующего алмаза толщиной 300 мкм;
- б) длина затвора (L_G) транзисторов равна 50...200 нм [7]; расстояние между омическими контактами к истоку и стоку равно 1 мкм; транзисторы имеют гребенчатую структуру с шириной затвора $W1$. (На рис. 1 представлен вариант поперечного разреза транзистора с характерными размерами и фрагмент гребенчатой структуры алмазного транзистора.) Здесь затвор транзистора отделен от δ-легированного бором слоя высокоомным алмазом;
- в) заземление истоков транзисторов осуществляется через металлизированные торцы кристалла;
- г) верхним слоем металлизации истока и стока является золото, толщина слоя 2 мкм;
- д) материал затвора – алюминий.

Для согласования измерительных СВЧ-усилителей используются микрополосковые линии на

поликоре и конденсаторы на диэлектрике с высокой диэлектрической проницаемостью.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

При двумерном квазигидродинамическом моделировании активной области транзистора была использована зависимость дрейфовой скорости дырок от напряженности электрического поля, приведенная в [8]. В данной работе рассчитано семейство вольт-амперных характеристик (ВАХ) инвертированного полевого транзистора с барьером Шоттки (ПТШ), имеющего длину затвора $L_G = 50 \text{ нм}$ и ширину $W = 1 \text{ мм}$ (рис. 2а). Как видно из рис. 2а, напряжение отсечки ПТШ меняется с увеличением V_{DS} . Этот эффект связан с особенностью поведения ПТШ с ультракоротким затвором (50 нм), что подтверждается результатами моделирования транзистора с длиной затвора $L_G = 200 \text{ нм}$ (рис. 2б). Этот транзистор отличается от транзистора, соответствующего рис. 1, только длиной затвора. В настоящее время решается вопрос об изготовлении транзистора с длиной затвора $L_G = 200 \text{ нм}$, поэтому дальнейшие исследования проводились именно для этого транзистора.

В рабочей точке (см. крестик на рис. 2) активная область ПТШ с длиной затвора, равной 50 нм, имеет удельную крутизну $S_0 = 46.3 \text{ мСм/мм}$ при удельной емкости затвор–исток $C_0 = 0.13 \text{ пФ/мм}$. Таким образом, внутренний транзистор (активная область) имеет граничную частоту усиления по току

$$f_t = S_0 / (2\pi C_0) = 56.7 \text{ ГГц.} \quad (1)$$

Граничная частота усиления по току для ПТШ, соответствующего рис. 2б, равна $f_t = 47.6 \text{ ГГц}$.

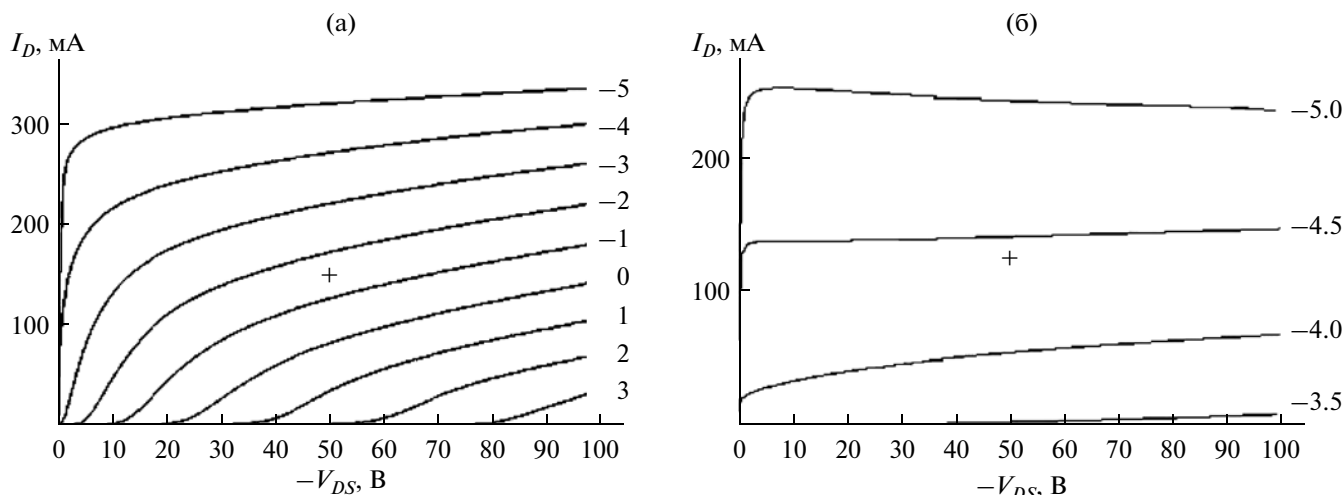


Рис. 2. ВАХ активной области ПТШ с длиной затвора $L_G = 50$ (а) и 200 нм (б) при различных значениях V_{GS} (цифры на кривых справа).

При проектировании топологии транзистора с гребенчатой конфигурацией затвора важно правильно выбрать ширину элементарного транзистора ($W1$, см. рис. 1): она должна быть по возможности максимальной, чтобы количество элементарных транзисторов в гребенке $n = W/W1$ (W – полная ширина затвора) не было слишком большим.

Величина $W1$ ограничивается требованием равенства в любой момент времени напряжения затвор–канал вдоль затворной металлической полоски каждого элементарного транзистора. Критерий выбора допустимой величины $W1$ следует из того, что элементарный затвор в направлении его ширины рассматривается как распределенная R - L - C -линия [9]. При подаче с затворной контактной площадки СВЧ-напряжения на затворную полоску по ней распространяется волна напряжения с коэффициентом распространения

$$\gamma = \sqrt{[(R_{зп} + J \times 2\pi f L_{зп})J \times 2\pi f C_{зп0}/W]}. \quad (2)$$

Здесь $R_{зп}$ – погонное сопротивление металлической затворной полоски, J – мнимая единица, f – рабочая частота, $L_{зп}$ – погонная индуктивность металлической затворной полоски, $C_{зп0}$ – емкость затвор–исток в рабочей точке.

Если $\gamma_{W1} = W1\gamma$, то выбор допустимой величины $W1$ определяется неравенством:

$$NEQ = NEQ1 \times NEQ2 > 0.9, \quad (3)$$

где $NEQ1 = \cos[-\text{Im}(\gamma_{W1})]$, $NEQ2 = \exp[-\text{Re}(\gamma_{W1})]$. Выполнение данного неравенства означает, что в любой момент времени различие мгновенного напряжения в любой точке затвора не будет превышать 10%. Кроме всего прочего, это позволяет использовать эквивалентную схему на сосредоточенных элементах для анализа работы транзистора.

При длине затвора 200 нм и $W1 = 50$ мкм получили величину $NEQ = 0.916$ (на частоте 15 ГГц). Это позволяет выбрать в качестве ширины элементарного затвора величину $W1 = 50$ мкм.

По аналогии с НЕМТ на GaN, например типа TGF2023-20 [10], топологию мощного алмазного транзистора было решено строить в виде параллельно включенных ячеек, каждая из которых имеет ширину затвора $W = 1.2$ мм, количество элементарных затворов в ячейке равно 24 (рис. 3).

В отличие от транзисторов типа TGF2023, в которых истоки заземляются через металлизированные отверстия в подложке, ячейка, показанная на рис. 3, строится на основе копланарной техники. Транзистор включается в копланарную линию, образованную контактными площадками затвора и стока, а также боковыми “земляными” полосками. Ширина контактных площадок – 100 мкм, зазор между контактными площадками и копланарными земляными полосками – 5 мкм (волновое сопротивление копланарной линии – 40 Ом). Земляные (боковые) полоски копланарной линии соединяются по краям с обратной металлизированной стороной кристалла с помощью торцевой металлизации, которая может проводиться при использовании термического напыления металлов типа Ti/Pt/Au. Это необходимо для обеспечения перехода с копланарной линии на микрополосковые, с помощью которых будут строиться цепи согласования транзистора с входом и выходом измерительной гибридной интегральной схемы.

Учитывая высокую теплопроводность алмаза, было решено делать ширину контактных полосок стока и истока в ячейке транзистора достаточно малой, равной 5 мкм (см. рис. 1). Это позволило уменьшить размеры ячейки транзистора. О воз-

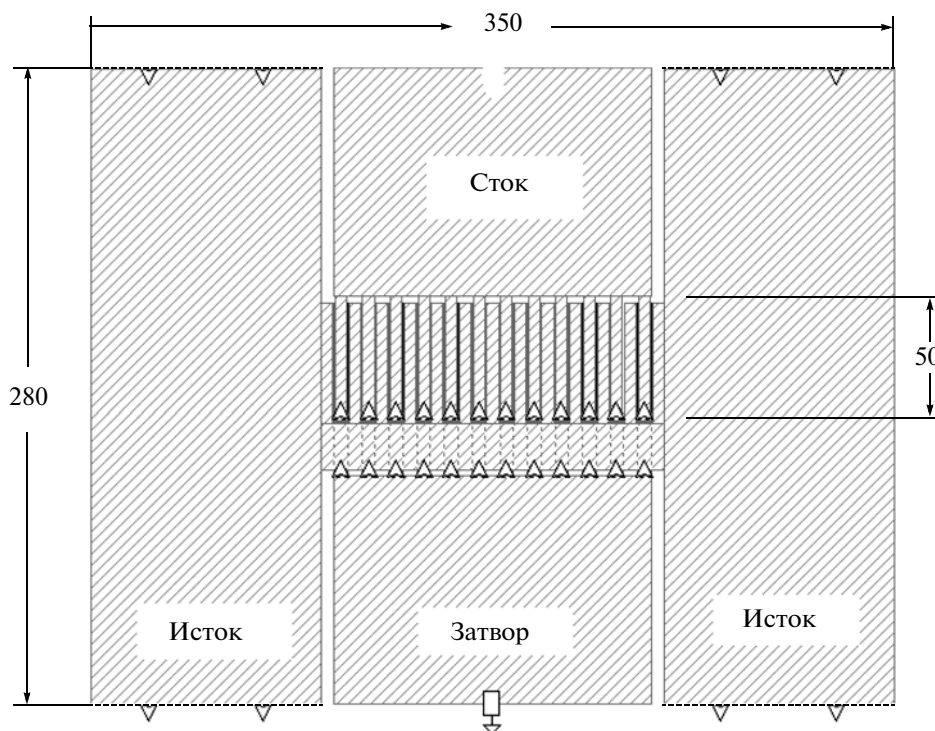


Рис. 3. Ячейка мощного ПТШ на основе алмаза, $W = 1.2$ мм.

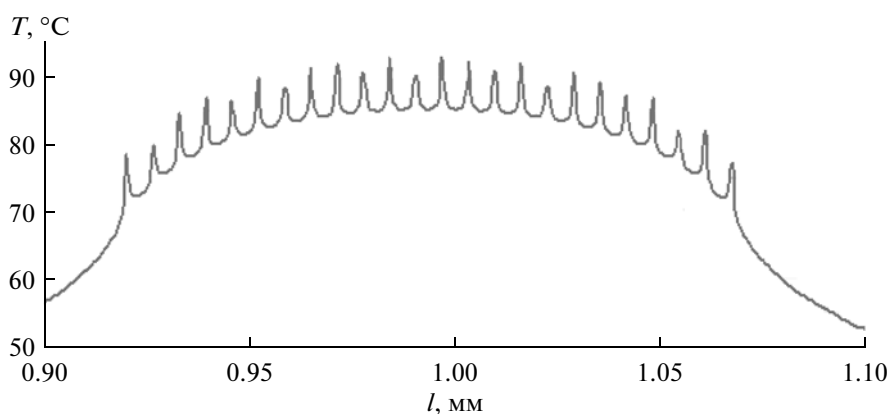


Рис. 4. Распределение температуры на поверхности ячейки алмазного ПТШ вдоль оси, проходящей через середины элементарных затворов.

возможности такого решения свидетельствуют выполненные по методике [11] результаты расчетов, приведенные на рис. 4. Они относятся к ячейке ПТШ, состоящей из 24-х элементарных транзисторов с шириной затвора по 50 мкм (суммарная ширина затвора 1.2 мм). Ячейка была создана на кристалле алмаза толщиной 300 мкм. Кристалл припаивали к металлическому основанию из сплава МД-40 толщиной 1.6 мм. Температура обратной стороны основания равна 20°C. При отдаваемой СВЧ-мощности, равной 3.1 Вт, и добавочном КПД, равном 40%, перегрев самой горячей точки в ячейке ПТШ относительно обратной сто-

роны основания составил всего 77.2°C, что соответствует тепловому сопротивлению, равному 9.85 град/Вт. Для сравнения, ячейка транзистора TGF2023 имеет суммарную ширину затвора 1.25 мм и тепловое сопротивление 16 град/Вт [12].

При анализе и оптимизации работы ячейки транзистора использовались параметры нелинейной эквивалентной схемы активной области транзистора, рассчитанные по программам [4–6]. Для нахождения параметров дополнительных реактивных элементов эквивалентной схемы, вносимых выбранной топологией транзистора, проводилось

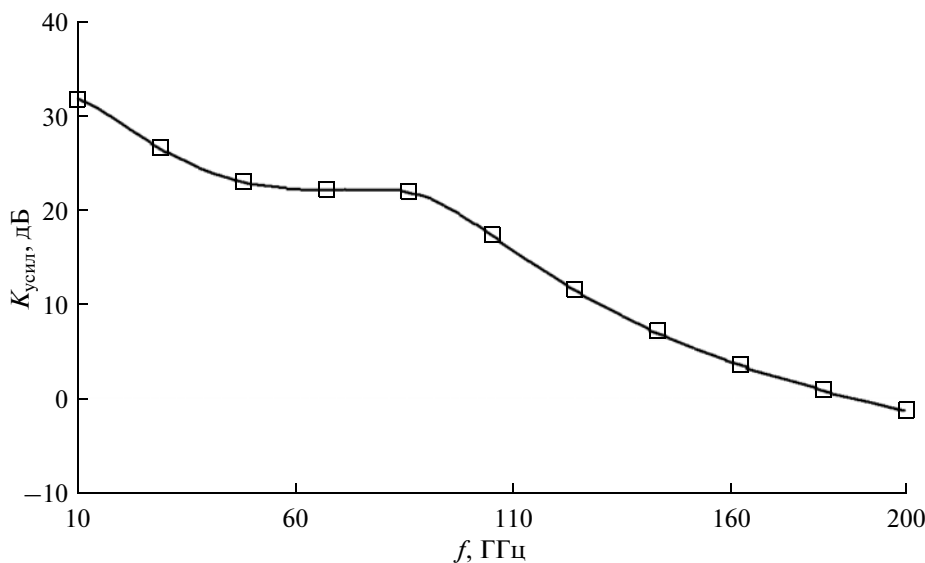


Рис. 5. Зависимость однонаправленного коэффициента усиления $K_{устл}$ на малом сигнале от частоты.

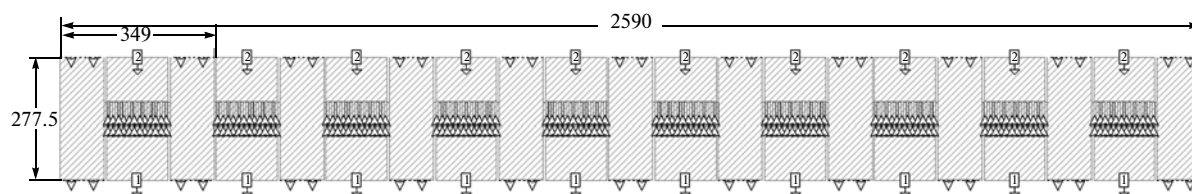


Рис. 6. Кристалл мощного алмазного полевого транзистора, состоящий из десяти ячеек.

электромагнитное моделирование топологии на изолирующем алмазе в САПР SONNET SUITE.

На рис. 5 показаны результаты расчета однонаправленного коэффициента усиления ячейки транзистора от частоты. Видно, что максимальная частота генерации ячейки транзистора равна 189 ГГц.

Для анализа и оптимизации работы транзистора на большом сигнале ячейку транзистора помещали в гибридную интегральную схему (ГИС) СВЧ-усилителя. Проводили оптимизацию пассивных элементов СВЧ ГИС для получения выходной СВЧ-мощности более 3 Вт. Режим работы транзисторов на постоянном токе при отсутствии входного СВЧ сигнала: напряжение сток-исток равно 50 В, ток стока равен 150 мА. Ниже приведены результаты оптимизации ячейки мощного алмазного ПТШ для частоты 15 ГГц на большом сигнале:

f , ГГц	15
$P_{вых}$, мВт	3095.5
КПД, %	39.4
K_p , дБ	16.4
S_{21} , дБ	19.25

Как видно из приведенных данных, отдаваемая на частоте 15 ГГц СВЧ-мощность равна 2.6 Вт на 1 мм ширины затвора при усилении 16.4 дБ.

Входные и выходные платы измерительных ГИС усилителя, изготавливаются на поликоре толщиной 250 мкм. Во входных цепях согласования используются конденсаторы, выполняемые в виде микрополосковых линий на диэлектрике толщиной 300 мкм с относительной диэлектрической проницаемостью, равной 100. Использование таких элементов является общепринятым в технике мощных СВЧ ГИС усилителей. Разделительные конденсаторы на входе и выходе ГИС, а также конденсаторы фильтров питания являются навесными элементами.

Для получения более высокой выходной мощности, например 50 Вт, предлагается складывать мощность двух транзисторов, каждый из которых имеет десять описанных выше ячеек (рис. 6). Для получения выходной мощности 50 Вт достаточно обеспечить эффективность сложения 81%, что является вполне выполнимой технической задачей.

* * *

Таким образом, спроектированный мощный алмазный полевой транзистор позволяет реализовать отдаваемую СВЧ-мощность 50 Вт на частоте 15 ГГц при усилении 15...16 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.Г., Колковский Ю.В., Концевой Ю.А. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. С. 186.
2. Алтухов А.А., Бугаев А.С., Гуляев Ю.В. и др. // Успехи совр. радиоэлектроники. 2011. № 6. С. 3.
3. Shiomi H., Nishibayashi Y., Toda N., Shikata S.-I. // IEEE Electron Device Lett. 1995. V. 16. № 1. P. 36.
4. Зубков А.М., Гарбер Г.З., Красильников В.Д. // Электрон. техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2009. Вып. 2. С. 18.
5. Гарбер Г.З. // РЭ. 2003. Т. 48. № 1. С. 125.
6. Гарбер Г.З. // РЭ. 2005. Т. 50. № 7. С. 892.
7. Moran D., Mac Laren D.A., Porro S. et al. // Microelectronic Engineering. 2011. V. 88. № 8. P. 2691.
8. Diamond: Electronic Properties and Applications / Eds. L.S. Pan, D.R. Kania, Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1995. P. 254.
9. Zubkov A.M. // Proc. 24 Eur. Microwave Conf. Cannes. France. 5–8 September 1994. P. 860.
10. www.triquimt.com/products/p/TGF2023-20 (90 Watt Discrete Power GaN on SiC HEMT).
11. Глыбин А.А., Иванов К.А., Курмачев В.А., Филатов А.Л. // Электрон. техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2012. Вып. 1. С. 86.
12. www.triquimt.com/products/p/TGF2023-01 (6 Watt Discrete Power GaN on SiC HEMT).

Сдано в набор 11.12.2013 г.	Подписано к печати 21.02.2014 г.	Дата выхода в свет 23 ежем.	Формат 60 × 88 ^{1/8}
Цифровая печать	Усл. печ. л. 13.0	Усл. кр.-отт. 2.1 тыс.	Уч.-изд. л. 13.0
	Тираж 153 экз.	Зак. 74	Бум. л. 6.5
		Цена свободная	

Учредители: Российская академия наук, Институт радиотехники и электроники РАН

Издатель: Российская академия наук. Издательство "Наука", 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90
 Оригинал-макет подготовлен МАИК "Наука/Интерпериодика"
 Отпечатано в ППП "Типография "Наука", 121099 Москва, Шубинский пер., 6