

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ СВЧ МОЩНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ И АЛМАЗА

© И. М. Аболдуев, Г. З. Гарбер, А. М. Зубков, К. А. Иванов, Ю. В. Колковский,
В. Д. Красильников, В. М. Миннебаев

ОАО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной пр., 27

Представлены температурные зависимости выходной мощности на большом сигнале коэффициента усиления и коэффициента полезного действия AlGaIn/GaN HFET и двух типов алмазных полевых транзисторов, полученные после обработки результатов двумерного моделирования активных областей транзисторов.

Ключевые слова: двумерное моделирование, коэффициент усиления по мощности, коэффициент полезного действия по добавленной мощности, полевые транзисторы

Сведения об авторах: Аболдуев Игорь Михайлович, к.т.н., mail6@pulsarnpp.ru; Гарбер Геннадий Зеликович, д.т.н., профессор, ggarber@mail.ru; Зубков Александр Михайлович, к.т.н., amzubkov@pulsarnpp.ru; Иванов Кирилл Андреевич, mail6@pulsarnpp.ru; Колковский Юрий Владимирович, д.т.н., профессор, kolk@pulsarnpp.ru; Красильников Валентин Дмитриевич, amzubkov@pulsarnpp.ru; Миннебаев Вадим Минхатович, к.т.н., mail6@pulsarnpp.ru

THE MICROWAVE PARAMETERS TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE GAN AND DIAMOND POWER FETS

I. M. Abolduev, G. Z. Garber, A. M. Zubkov, K. A. Ivanov, Yu. V. Kolkovsky,
V. D. Krasilnikov, V. M. Minnebaev

JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okružhnoy proezd, 27

By processing of results of two-dimensional simulation of the transistor active region, the temperature dependences of the output power, gain and power added efficiency of the AlGaIn/GaN HFET and two types of the diamond field-effect transistor are calculated.

Keywords: two-dimensional simulation, power gain, power added efficiency, field-effect transistors

Data of authors: Abolduev Igor Mikhailovich, Ph.D., mail6@pulsarnpp.ru; Garber Gennadiy Zelikovich, Sc. D., Prof., ggarber@mail.ru; Zubkov Alexander Mikhailovich, Ph.D., amzubkov@pulsarnpp.ru; Ivanov Kirill Andreevich, mail6@pulsarnpp.ru; Kolkovsky Yuri Vladimirovich, Sc.D., Prof., kolk@pulsarnpp.ru; Krasilnikov Valentin Dmitrievich, amzubkov@pulsarnpp.ru; Minnebaev Vadim Minkhatovich, Ph.D., mail6@pulsarnpp.ru

Введение

В последние годы во всём мире ведутся интенсивные работы по созданию СВЧ мощных полевых транзисторов на основе широкозонных полупроводниковых материалов в сантиметровом диапазоне частот [1]. Основ-

ные преимущества AlGaIn/GaN мощных СВЧ гетерополевых транзисторов (HFET) перед кремниевыми и арсенид-галлиевыми транзисторами рассмотрены в [2]. Важнейшим из них является высокая температуроустойчивость при высокой плотности отдаваемой

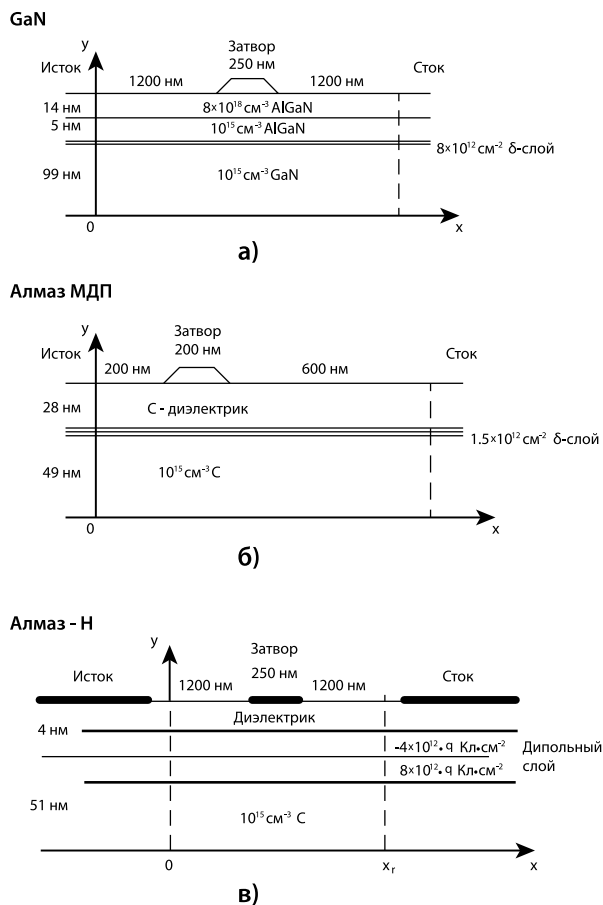


Рис. 1

Структура исследуемых транзисторов:
(а) AlGaIn/GaN HFET, (б) алмазный МДП транзистор, (в) транзистор, полученный путём обработки алмаза водородной плазмой,
q – заряд электрона

СВЧ мощности и высокий коэффициент полезного действия по добавленной мощности (power added efficiency – PAE). Пример создания широкополосного СВЧ усилителя на AlGaIn/GaN HFET приведён в [3].

Сочетание сверхвысокой теплопроводности, высокой скорости дрейфа носителей тока (дырок), высокой пробивной напряжённости электрического поля и сравнительно низкой диэлектрической проницаемости при высоком удельном сопротивлении нелегированного материала делают алмаз перспективным материалом для мощных СВЧ приборов [1]. В [4] намечены пути создания СВЧ мощных МДП алмазных транзисторов в сантиметровом диапазоне.

Целью настоящей работы является сравнение температурных зависимостей ос-

новных характеристик AlGaIn/GaN HFET и полевых транзисторов на основе алмаза.

Методика исследования

Исследование проводилось на основе двумерного моделирования работы активной области транзисторов, структура которых представлена на рис. 1.

На рис. 1а показана структура AlGaIn/GaN HFET. В этом полевом транзисторе канал образуется за счёт накопления электронов в потенциальной яме на границе AlGaIn/GaN гетероперехода. Параметры эпитаксиальных слоёв (рис. 1а) подобраны таким образом, чтобы расчётные СВЧ параметры транзистора были близки к соответствующим параметрам транзистора, выпускаемого фирмой TriQuint Semiconductor [5]. Канал алмазного МДП полевого транзистора (рис. 1б) получается путём сильного легирования бором тонкого δ -слоя при эпитаксиальном выращивании искусственных плёнок алмаза [6].

Канал транзистора, показанного на рис. 1в, образуется путём обработки водородной плазмой поверхности алмаза [7]. При этом поверхность алмаза приобретает отрицательное сродство к электрону. При воздействии на эту поверхность воздуха, содержащего молекулы O_2 , H_2O , CO_2 , в адсорбированном слое на поверхности алмаза образуются отрицательно заряженные ионы OH^- и HCO_3^- . Отрицательно заряженный слой ионов приводит к изгибу вверх потолка валентной зоны алмаза с образованием у поверхности дипольного слоя с подвижными дырками в потенциальной яме. Для стабилизации этого дипольного слоя перед формированием затвора полевого транзистора на поверхность наносят тонкий слой диэлектрика [8].

В реальных транзисторах активная область лежит на подложке изолятора, в качестве которого используется карбид кремния у AlGaIn/GaN HFET и нелегированный алмаз у алмазных транзисторов. Справа и слева от активной области расположены пассивные участки стока и истока. Поперечное сечение затворной металлизации имеет форму «гриба». Это снижает паразитное сопротивление затвора транзистора. Кроме того, часть

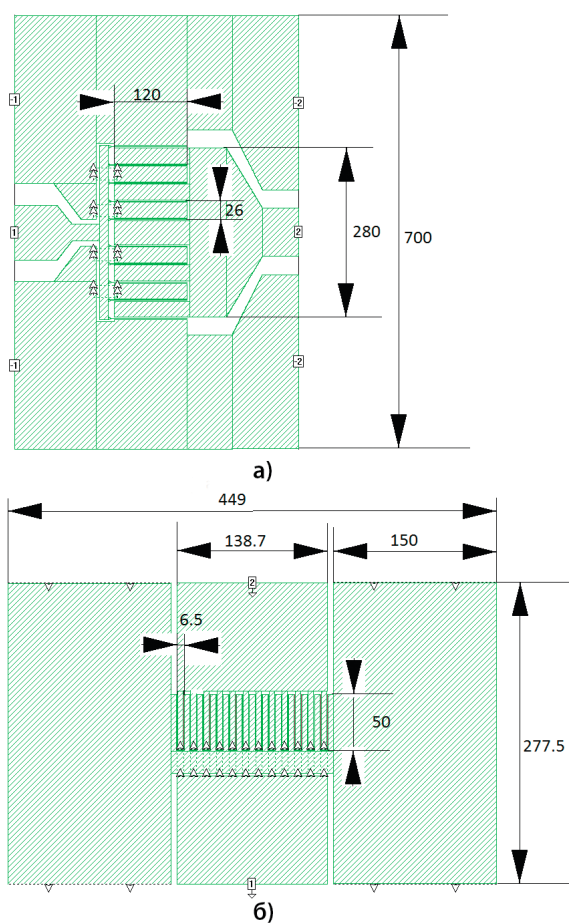


Рис. 2

Топологии исследуемых (а) AlGaIn/GaN HFET и (б) алмазных полевых транзисторов

шляпки «гриба», расположенная над областью стока, играет роль так называемой полевой обкладки. Полевая обкладка увеличивает пробивное напряжение сток-исток [9].

При моделировании работы активной области транзисторов, представленных на рис. 1, на сетке напряжений затвор-исток и сток-исток решалась система уравнений квазигидродинамической модели переноса носителей тока [10-12]. После обработки результатов моделирования с помощью программы CIFET [13] получается семейство стоковых вольтамперных характеристик транзистора, зависимости от прикладываемых напряжений ёмкостей затвор-исток и затвор-сток, а также время пролёта носителей через неомическую часть канала и временная постоянная входной RC цепочки. Полученные зависимости и временные параметры использовались для нахождения параметров нелинейной модели

транзистора по программе CIFET_CE [14]. Найденные значения параметров нелинейной модели применялись для расчёта СВЧ характеристик приборов в программе Microwave Office [15]. Кроме того, для выбранной топологии рассчитывались паразитные параметры эквивалентной схемы транзистора: сопротивление затвора – по параметрам затворной металлизации; сопротивления стока и истока – по электрическим параметрам канала транзистора и данным о контактных сопротивлениях к стоку и истоку. Дополнительные ёмкости и индуктивности, связанные с конкретной конфигурацией металлизации транзистора, находились путём электромагнитного моделирования металлизации в программе Sonnet Suite [16]. Топологии исследуемых транзисторов показаны на рис. 2.

Исследуемые в данной работе AlGaIn/GaN HFET (рис. 2а) и алмазные полевые транзисторы (рис. 2б) имеют одинаковую суммарную ширину затвора равную 1,2 мм.

СВЧ характеристики транзисторов при их работе на большом сигнале рассчитывались с помощью системы программ Microwave Office [15]. Используемая в этих расчётах нелинейная эквивалентная схема транзистора показана на рис. 3.

Значком «транзистор» на рис. 3 обозначена кубическая модель Куртиса для активной области транзистора. «Зашитая» в систему Microwave Office модель Куртиса задаёт зависимость ёмкости от напряжения по закону, справедливому для резкого р-п перехода, что не соответствует действительным изменениям ёмкостей в рассма-

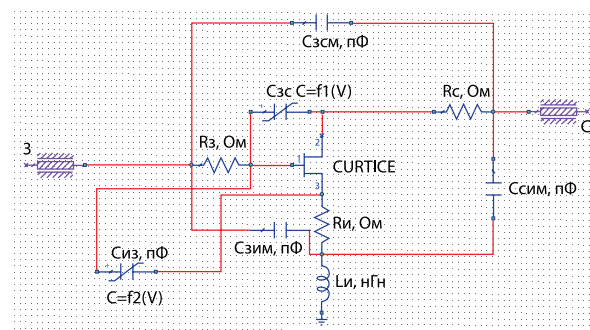


Рис. 3

Эквивалентная схема исследуемых транзисторов в формате системы Microwave Office

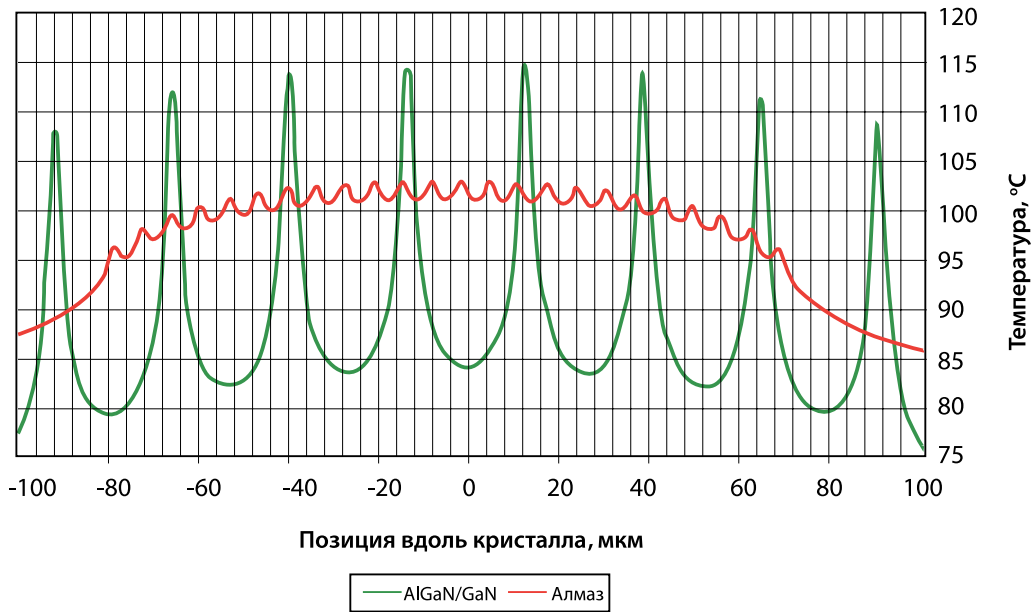


Рис. 4

Распределение температуры по поверхности кристаллов AlGaIn/GaN HFET (зелёная кривая) и алмазного транзистора (красная кривая) вдоль оси, проходящей через середину затворов

триваемых транзисторах. Поэтому ёмкости активной области транзистора в эквивалентной схеме рис.3 приравнены к нулю, а к внешним зажимам модели активной области подключены переменные конденсаторы, изменение которых с напряжением задаётся полиномами [19], проходящими через значения, рассчитанные по программе CIFET для активной области транзистора. На входе и выходе эквивалентной схемы (рис. 3) включены отрезки копланарных линий с размерами, взятыми из рис. 2.

Результаты расчётов

На первом этапе исследований по программе [20] проводились расчёты распределения температуры на поверхности кристаллов транзисторов при заданной рассеиваемой мощности, соответствующей работе транзисторов на большом сигнале (рис. 4).

Рис. 4 соответствует транзисторам, изображённым на рис. 1 и 2. Кристаллы транзисторов, изображённые на рис. 1а и 2а, под активной областью имеют подложку из карбида кремния толщиной 100 мкм, а кристаллы транзисторов, изображённые на рис. 1б, 1в и 2б, имеют подложку из алмаза толщиной 300 мкм. Транзисторы помещены

в корпуса с основанием из сплава МД-40 толщиной 1,6 мм. Температура дна основания равна 20 °С. AlGaIn/GaN HFET рассеивает мощность 6,88 Вт, алмазный транзистор – 7,84 Вт. Изменения температуры по поверхности транзистора определяются тем, что основное тепловыделение происходит в узком слое между стоком и затвором, там, где напряжённость электрического поля максимальна. У AlGaIn/GaN HFET эти области повторяются с шагом 26 мкм, у алмазных – с шагом 6,5 мкм. В топологии алмазных транзисторов шаг выбран меньше, чем у AlGaIn/GaN HFET, поскольку теплопроводность алмазной подложки существенно выше, чем подложки из карбида кремния – 2000 Вт/мК по сравнению с 370 Вт/мК. По данным рис. 4 рассчитано тепловое сопротивление транзисторов относительно самых горячих точек на поверхности: для AlGaIn/GaN HFET оно равно 13,8 К/Вт, для алмазного транзистора – 10,5 К/Вт.

На втором этапе по полученным тепловым сопротивлениям для каждой температуры канала и рассеиваемой мощности рассчитывалась температура основания корпуса и наоборот – максимальная темпе-

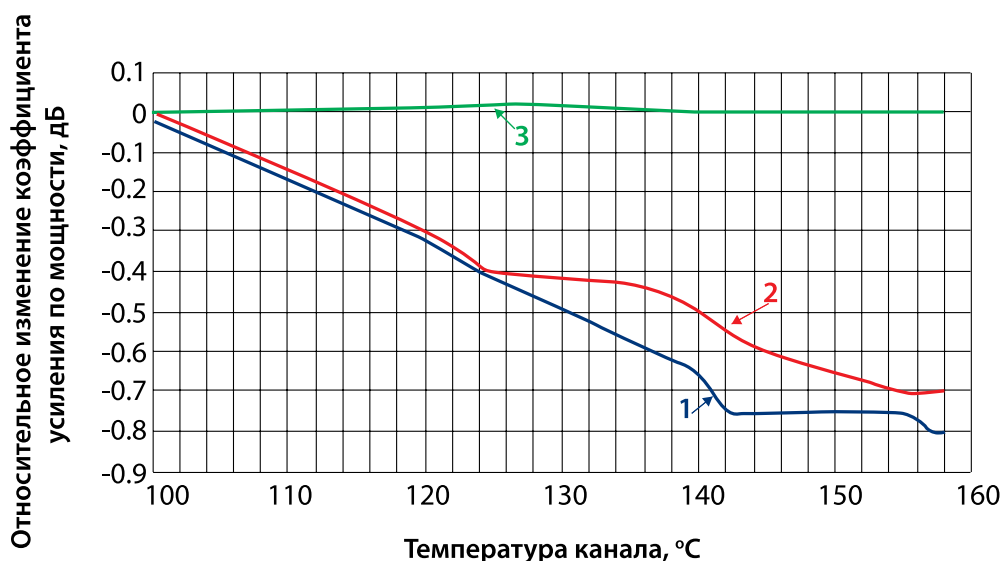


Рис. 5

Сопоставление результатов измерения коэффициента усиления по мощности AlGaIn/GaN HFET с расчётами: 1 – расчёт, 2 – измерения на частоте $f = 10,5$ ГГц, 3 – измерения на частоте $f = 9,7$ ГГц

ратура канала при измеренной температуре основания корпуса. Сначала проводилась экспериментальная проверка результатов расчёта для AlGaIn/GaN HFET (рис. 5).

Рис. 5 соответствует результатам исследования работы AlGaIn/GaN HFET в гибридной интегральной схеме (ГИС) усилителя с рабочей полосой 9,7-10,5 ГГц. Как показывают результаты сравнения, на частоте 10,5 ГГц данные расчёта близки к экспериментальным данным до температуры

канала 125 °C. Наибольшее расхождение (27 %) наблюдалось при температуре канала 142 °C. На частоте 9,7 ГГц коэффициент усиления с увеличением температуры канала практически не менялся. Это объясняется тем, что на частоте 9,7 ГГц с увеличением температуры улучшались условия СВЧ согласования кристалла в данной схеме усилителя. В дальнейшем будем считать, что результаты расчётов соответствуют наихудшему случаю.

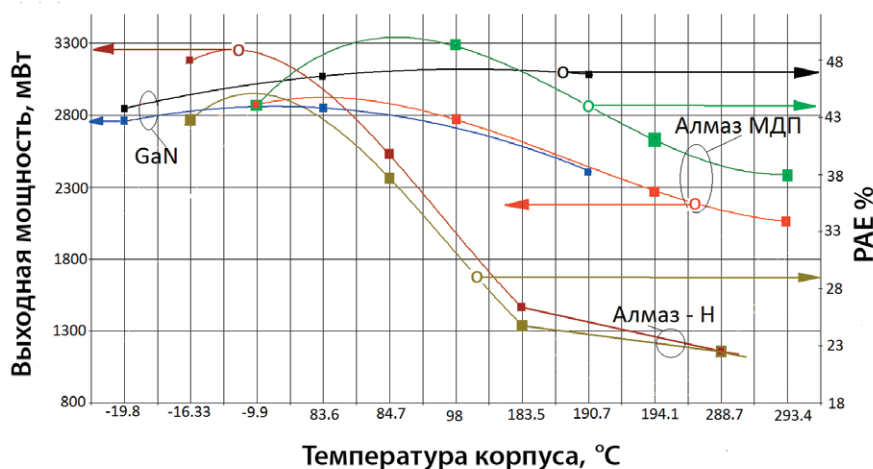


Рис. 6

Зависимость выходной мощности и КПД по добавленной мощности (PAE) от температуры основания корпуса

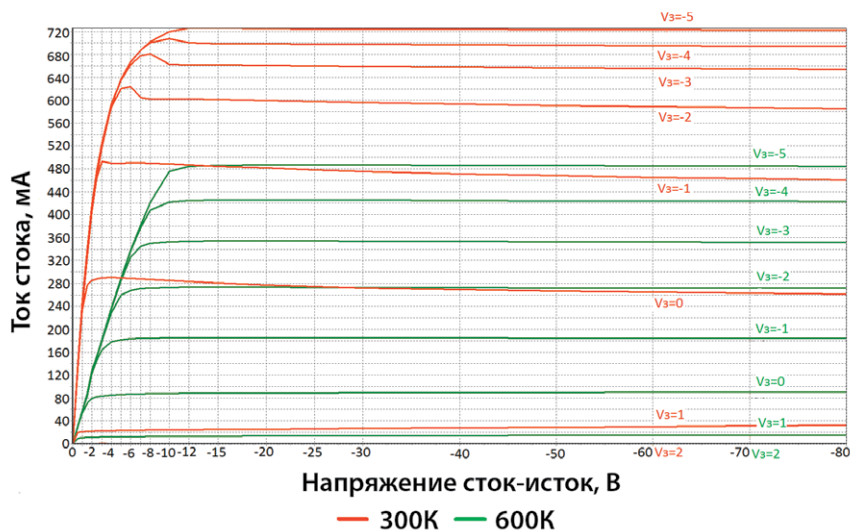


Рис. 7

Семейства стоковых вольтамперных характеристик транзистора на алмазе, обработанном водородом

На третьем этапе проведено моделирование ГИС СВЧ усилителей на частоту 15 ГГц с описанными выше транзисторами. Расчёты проводились для температур канала 300 К, 400 К, 500 К и 600 К. Для каждой температуры закладывались соответствующие зависимости скорости носителей тока от напряжённости электрического поля [17, 18]. Цепи согласования ГИС усилителей оптимизировались при температуре канала равной 400 К. В дальнейших расчётах согласующие цепи ГИС не изменялись. По результатам расчётов находилась мощность, рассеиваемая в активной области транзисторов. Затем по тепловому сопротивлению определялась температура основания корпуса транзистора. Расчёты проводились при входной мощности равной 100 мВт. На рис. 6 показаны полученные результаты моделирования выходной мощности и КПД по добавленной мощности (РАЕ) ГИС.

Как видно из рис. 6, характер изменения параметров AlGaIn/GaN HFET и алмазных МДП транзисторов при изменении температуры близки. При высоких температурах падение отдаваемой мощности и КПД происходит из-за уменьшения максимального тока стока и крутизны транзисторов (рис. 7). У транзисторов из алмаза, обработанного водородом,

с увеличением температуры отдаваемая мощность и КПД уменьшаются быстрее. Это связано с тем, что у этих транзисторов с увеличением температуры происходит более быстрое рассогласование с СВЧ трактом, в основном, из-за существенного (более, чем в два раза) изменения ёмкости затвор-исток.

Выводы

1. В диапазоне рабочих температур AlGaIn/GaN HFET температурные зависимости СВЧ параметров этих транзисторов и алмазных МДП транзисторов очень близки.
2. Рабочий диапазон температур алмазных МДП транзисторов шире, чем AlGaIn/GaN HFET, по крайней мере на 100 °С.
3. При узкополосном согласовании полевые транзисторы на алмазе, обработанном в водородной плазме, демонстрируют более резкое ухудшение характеристик с повышением температуры. По-видимому, это можно исправить, используя цепи широкополосного согласования кристалла транзистора с СВЧ трактом.
4. Разработанная методика расчёта температурных зависимостей характеристик СВЧ транзисторов на основе нелинейных моделей, параметры которых получены путём двумерного моделирования активной области транзистора, показала удовлетво-

рительные результаты совпадения с экспериментальными данными и может быть использована для проектирования согласующих цепей усилителей мощности.

Литература

1. Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. – М.: Техносфера, 2011.
2. Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. Применение GaN устройств в условиях космического пространства // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2014. – № 2 (233). – С. 20-25.
3. Борисов О. В., Зубков А. М., Иванов К. А., Миннебаев В. М., Редька Ал. В. Широкополосный 70-ваттный GaN усилитель мощности X-диапазона // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2014. – № 2 (233). – С. 4-9.
4. Гарбер Г. З., Дорофеев А. А., Зубков А. М., Иванов К. А., Колковский Ю. В. Проектирование с помощью моделирования на ЭВМ СВЧ мощных полевых транзисторов на основе алмаза // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2013. – № 1 (230). – С. 9-16.
5. Discrete Power GaN on SiC HEMT. – TriQuint SEMICONDUCTOR, фирменные каталоги, 2011. URL: www.triquint.com/products/p/TGF2023 (дата обращения: 16.02.15).
6. Yasar Gurbuz et al. Diamond semiconductor technology for RF device applications. Solid-State Electronics, v. 49, 2005, pp. 1055-1070.
7. Christoph E. Nebel Surface Transfer-Doping of H-Terminated Diamond with Adsorbates. New Diamond and Frontier Carbon Technology, v. 15, № 5, 2005, pp. 247-264.
8. Kazuyuki HIRAMA et al. Thermally Stable Operation of H-Terminated Diamond FETs by NO₂ Adsorption and Al₂O₃ Passivation. IEEE Electron Device Letters, v. 33, № 8, August 2012, pp. 1111-1113.
9. Зубков А. М., Гарбер Г. З., Малеев С. А. Исследование на ЭВМ связи пробивного напряжения HFET на основе GaAs с размерами затворной полевой обкладки // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2009. – № 1 (222). – С. 32-37.
10. Гарбер Г. З. Нелинейное динамическое моделирование полевых СВЧ транзисторов с затвором Шоттки на арсениде галлия: обзоры по электронной технике. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1990. – 48 с. – (Серия 2. Полупроводниковые приборы; Вып. 2).
11. Гарбер Г. З. Квазигидродинамическое моделирование гетероструктурных полевых транзисторов // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, № 1. – С. 125-128.
12. Garber G. Z. Estimation of the accuracy of the microwave FET equivalent circuit using the quasi-hydrodynamic model of electron transport. Solid-State Electronics, v. 103 (2015), pp. 115-121, January.
13. Гарбер Г. З. Программы моделирования гетероструктурных полевых и биполярных транзисторов // Электронная промышленность. – 2003. – № 2. – С. 260-266.
14. Красильников В. Д. Программа расчётов параметров модели полевых транзисторов с барьером Шоттки Куртиса-Эттенберга (CIFET_CE) // Свидетельство о государственной регистрации программы № 2004611788 от 29.07.2004.
15. AWRDE 10 Edition User Guide, фирма AWR, 2013.
16. Sonnet Suite 13.56 Edition User's Manuel, фирма SONNET, 2014.
17. Данилин В. Н., Докучаев Ю. П., Жукова Т. А., Комаров М. А. Мощные высокотемпературные и радиационно-стойкие СВЧ приборы нового поколения на широкозонных гетеропереходных структурах AlGaIn/GaN: обзоры по электронной технике. – М.: ГУП «НПП «Пульсар», 2001. – 137 с. – (Серия 1. СВЧ техника; Вып.1).
18. Diamond: Electronic properties and applications. Edited by Lawrence S. Pan Don R. Kania, Kluwer Academic Publishers, 1995, 254 p.
19. Зубков А. М. Исследования возможности использования кубической модели Куртиса для расчёта мощных СВЧ усилителей на AlGaIn полевых транзисторах // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2014. – № 1 (232). – С. 29-34.
20. Иванов К. А., Зубков А. М. Программа трёхмерного моделирования тепло- и массообмена // Свидетельство о государственной регистрации программы № 2013660267 от 30.10.2013.

References

1. Vasilev A. G., Kolkovsky Yu. V., Kontsevov Yu. A. *SVCH pribory i ustroystva na shirokozonnnykh poluprovodnikakh* [Microwave devices and equipments on wide-gap semiconductors]. Moscow, Tekhnosfera, 2011.
2. Kolkovsky Yu. V., Minnebaev V. M. Application of GaN devices in space environment. *Elektronnaya tekhnika*.

- Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2014, № 2, pp. 20-25.
3. Borisov O. V., Zubkov A. M., Ivanov K. A., Minnebaev V. M., Redka A. I. V. X-band 70-W GaN broadband power amplifier. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2014, № 2, pp. 4-9.
 4. Garber G. Z., Dorofeev A. A., Zubkov A. M., Ivanov K. A., Kolkovsky Yu. V. Design of the SHF power FET's on diamond base with assistance of computer simulation. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2013, № 1, pp. 9-16.
 5. Discrete Power GaN on SiC HEMT. – TriQuint SEMICONDUCTOR, data sheet, 2011. URL: www.triquint.com/products/p/TGF2023 (accessed 16 February 2015).
 6. Yasar Gurbuz et al. Diamond semiconductor technology for RF device applications. *Solid-State Electronics*, v. 49, 2005, pp. 1055-1070.
 7. Christoph E. Nebel Surface Transfer-Doping of H-Terminated Diamond with Adsorbates. *New Diamond and Frontier Carbon Technology*, v. 15, № 5, 2005, pp. 247-264.
 8. Kazuyuki Hirama et al. Thermally Stable Operation of H-Terminated Diamond FETs by NO₂ Adsorption and Al₂O₃ Passivation. *IEEE Electron Device Letters*, v. 33, № 8, August 2012, pp. 1111-1113.
 9. Zubkov A. M., Garber G. Z., Maleev S. A. Research on computer communication breakdown voltage of GaAs HFET with a gate field plate size. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2009, № 1, pp. 32-37.
 10. Garber G. Z. *Nelineynoe dinamicheskoe modelirovanie polevykh SVCH tranzistorov s zatvorom Shottki na arsenide galliya: obzory po elektronnoy tekhnike* [Nonlinear dynamic modeling of the microwave field effect transistors with gate Schottky on gallium arsenide: Reviews in Electronic Engineering]. Moscow, CRI «Electronica» Publ., 1990, 48 p.
 11. Garber G. Z. Quasi-hydrodynamic modeling heterostructure field-effect transistors. *Radiotekhnika i elektronika = Journal of Communications Technology and Electronics*, 2003, vol. 48, № 1, pp. 125-128.
 12. Garber G. Z. Estimation of the accuracy of the microwave FET equivalent circuit using the quasi-hydrodynamic model of electron transport. *Solid-State Electronics*, v. 103 (2015), pp. 115-121, January.
 13. Garber G. Z. Simulation program of the heterostructure bipolar and field-effect transistors. *Elektronnaya promyshlennost* [Electronic industry], 2003, № 2, pp. 260-266.
 14. Krasilnikov V. D. The program of Curtis-Ettenberg model parameters calculation for the Schottky barrier field-effect transistors. Certificate of state registration program № 2004611788 from 29.07.2004.
 15. AWRDE 10 Edition User Guide, firm AWR, 2013.
 16. Sonnet Suite 13.56 Edition User's Manuel, firm SONNET, 2014.
 17. Danilin V. N., Dokuchaev Yu. P., Zhukova T. A., Komarov M. A. *Moschnye vysokotemperaturnye i radiatsionno-stoykie SVCH pribory novogo pokoleniya na shirokozonykh geteroperekhodnykh strukturakh AlGaIn/GaN: obzory po elektronnoy tekhnike* [Powerful high-temperature and radiation-resistant microwave devices of a new generation of wide- heterojunction structures of AlGaIn /GaN: Reviews in Electronic Engineering]. Moscow, «SPE «Pulsar» Publ., 2001, 137 p.
 18. *Diamond: Electronic properties and applications*. Edited by Lawrence S. Pan Don R. Kania, Kluwer Academic Publishers, 1995, 254 p.
 19. Zubkov A. M. Study of the possibility of the cubic Curtis model using for the calculation of power microwave AlGaIn HFET's amplifiers. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2014, № 1, pp. 29-34.
 20. Ivanov K. A., Zubkov A. M. The program of the three-dimensional modeling of heat and mass transfer. Certificate of state registration № 2013660267 from 30.10.2013.