

УДК 621.38.049.77

МИКРОПОТРЕБЛЯЮЩИЕ УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ НА НИТРИДЕ ГАЛЛИЯ ДЛЯ ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ 8–12 ГГц

© 2019 г. С. А. Гамкрелидзе^{1, *}, Д. Л. Гнатюк¹, А. В. Зуев¹, М. В. Майтама¹,
П. П. Мальцев¹, А. О. Михалев^{1, **}, Ю. В. Федоров¹

¹Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской АН
Россия, 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр. 5

*E-mail: luhferas2010@yandex.ru

**E-mail: m2lkeny@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.12.2018 г.

После доработки 09.01.2019 г.

Принята к публикации 09.01.2019 г.

Рассмотрены характеристики каскадной схемы усилителя мощности на нитриде галлия с площадью кристалла в 4–6 раз меньшей по сравнению с традиционными усилителями на подложках карбида кремния для обеспечения выходной мощности до 3 Вт на частотах 8–12 ГГц при использовании в микропотребляющих усилителях мощности радиоэлектронной аппаратуры, применяемой в робототехнике и космических аппаратах.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, усилитель мощности, наногетероструктура AlGaN/AlN/GaN, каскадная схема включения транзисторов, микропотребляющие однокристалльные приемо-передающие модули, нитрид галлия, карбид кремния, сапфир, робототехника

DOI: 10.1134/S0544126919040057

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Создание электронной компонентной базы для обеспечения работоспособности твердотельных электронных систем в экстремальных условиях околоземного пространства или в специальной аппаратуре является чрезвычайно актуальной задачей [1, 2]. При этом большое значение имеет повышение энергетической эффективности монолитных интегральных схем (МИС).

Существует ряд областей радиоэлектроники, требующих достижения максимальной выходной мощности в СВЧ-диапазоне при отсутствии дополнительных теплоотводящих элементов, т.е. теплообмен только с кристалла МИС для обеспечения минимальных массогабаритных характеристик устройств. Прежде всего, такие требования возникают у разработчиков робототехнических устройств и космических аппаратов. Предельным ограничением рассеиваемой мощности с кристалла общепринято считать обеспечение выходной мощности до 3–4 Вт при рассеивании мощности на кристалле до 10 Вт.

Введем определение, что микро потребляющая электронная компонентная база должна потреблять ток менее 1 А на кристалл.

Таким образом, достичь необходимую величину выходной мощности можно варьируя значени-

ями тока и напряжения, а также конструктивно-технологическим базисом и схемотехническими решениями для формирования максимального коэффициента полезного действия (КПД) при минимальной массе и габаритах устройств.

Рассмотрим гипотетический подход к достижению предельного значения выходной мощности 3 Вт при условии 100% КПД и условия микро потребления усилителя мощности.

Например, основную проблему создания микро потребляющих мощных усилительных модулей СВЧ диапазона 8–12 ГГц можно решить за счет уменьшения тока потребления для обеспечения заданной мощности в соответствии законом Ома ($P = IU$).

Возможны два крайних варианта:

$$1 \text{ А} \times 3 \text{ В} = 3 \text{ Вт}, \quad (1)$$

$$0.1 \text{ А} \times 30 \text{ В} = 3 \text{ Вт}. \quad (2)$$

Рассмотрим, как можно реализовать эти варианты, используя два конструктивно-технологических решения на основе арсенида галлия (широко применяемого в промышленности) и нитрида галлия (перспективного технологического базиса).

Например, для достижения непрерывной выходной мощности $P_{\text{вых}} = 3.0$ Вт потребуются:

– при напряжении $U_{\text{п}} = 3.0$ В ток потребления $I = 1.0$ А при КПД = 100% (данные режимы могут обеспечиваться на арсениде галлия);

– при напряжении $U_{\text{п}} = 30.0$ В ток потребления $I = 0.1$ А (данные режимы могут обеспечиваться на нитриде галлия).

Для гармонического сигнала при усилительном режиме класса А потребляемая мощность определяется как произведение действующих значений напряжения и тока от источника питания, т.е. каждое значение деленное на $\sqrt{2}$.

Запишем выражение для КПД:

$$\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{потр}}} = \text{КПД}, \quad (3)$$

где

$$P_{\text{потр}} = U_{\text{дейст}} I_{\text{дейст}} = \frac{U_{\text{п}} I_{\text{п}}}{\sqrt{2}\sqrt{2}} = \frac{U_{\text{п}} I_{\text{п}}}{2}.$$

Для КПД равному 50% ток потребления от источника питания увеличится в 4 раза при заданном напряжении питания. Таким образом, ток потребления $I_{\text{п}}$ для арсенида галлия при $U_{\text{п}} = 3$ В составит 4 А и для нитрида галлия при $U_{\text{п}} = 30$ В составит 0.4 А.

При КПД = 30% амплитудное значение тока потребления от источника питания возрастет в 6.6 раз по сравнению с КПД = 100%.

Следовательно, для микропотребляющих мощных усилительных модулей СВЧ-диапазона можно снизить на порядок величины тока потребления и обеспечить потребление менее 1 А на основе перспективных технологических процессов с использованием наногетероструктур нитрида галлия вместо арсенида галлия или кремния-германия [3–5].

Оптимизация параметров микропотребляющих усилительных модулей по массе и габаритам связана с отсутствием дополнительных теплоотводящих конструкций и подразумевает сведение к минимально необходимому значению ширины токопроводящих частей под управлением затвора транзистора.

Удельный ток на 1 мм ширины затвора транзистора усилителя мощности для транзистора на образцах разработанных в ИСВЧПЭ РАН составляет:

– на арсениде галлия до 2.5 А/мм при пробивном напряжении 10 В;

– на нитриде галлия до 1.6 А/мм при пробивном напряжении 80 В. Таким образом, для нитрида галлия потребуется примерная ширина транзистора в 5 раз меньше чем на арсениде галлия для обеспечения выходной мощности 3 Вт.

Кроме того, в литературе [6] приведена плотность мощности на миллиметр ширины затвора для мощных транзисторов и отмечено:

– на арсениде галлия: полевые транзисторы имеют 1 Вт/мм на 10 ГГц и РНЕМТ 1.5 Вт/мм на 30 ГГц;

– на нитриде галлия НЕМТ имеют более 7 Вт/мм на 30 ГГц.

Следовательно, для микропотребляющих мощных усилительных модулей СВЧ диапазона частот 8–12 ГГц можно снизить в 5–7 раз как ток потребления, так и массогабаритные размеры мощных транзисторов на основе перспективных технологических процессов с использованием нано-гетероструктур нитрида галлия по сравнению с арсенидом галлия.

Миниатюризация усилителей открывает перспективы создания однокристалльных ППМ с уменьшенными габаритами и $P_{\text{вых}}$ до 3 Вт.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Микропотребляющие усилители мощности должны работать при напряжении питания до 30 В, что соответствует напряжению бортовой сети 28 В (безопасное напряжение), и обеспечивать минимальное потребление тока (менее 1 А).

В ИСВЧПЭ РАН разработан микропотребляющий усилитель мощности (УМ) на нитриде галлия для диапазона частот 8–12 ГГц с выходной мощностью около 3 Вт при напряжении питания 30 В, токе потребления 0.6 А и КПД не менее 30%, т.е. потребляемой или рассеиваемой мощностью на кристалле не более 10 Вт.

Одним из эффективных способов снижения потребляемой мощности МИС является уменьшение количества каскадов усиления (в идеале – до одного) путем повышения коэффициента усиления единичного каскада. В этой связи уникальными возможностями обладает каскадная схема включения транзисторов (первый транзистор включен с общим истоком и второй транзистор включен с общим затвором), которая особенно интересна при использовании нитрид-галлиевой технологии, т.к. позволяет технологически совместить два транзистора в одном каскаде и значительно уменьшить его площадь. Потребность в миниатюризации площади кристалла СВЧ МИС связана с высокой стоимостью подложки карбида кремния по сравнению с арсенидом галлия. При этом разница в цене достигает двух порядков величины.

Электрическая схема МИС УМ выполнена на основе двух параллельно соединенных схем транзисторов в каскадном включении на Т1 с Т3 и Т2 с Т4, работающих на общую нагрузку, и показана на рис. 1. Топология МИС приведена на рис. 2.

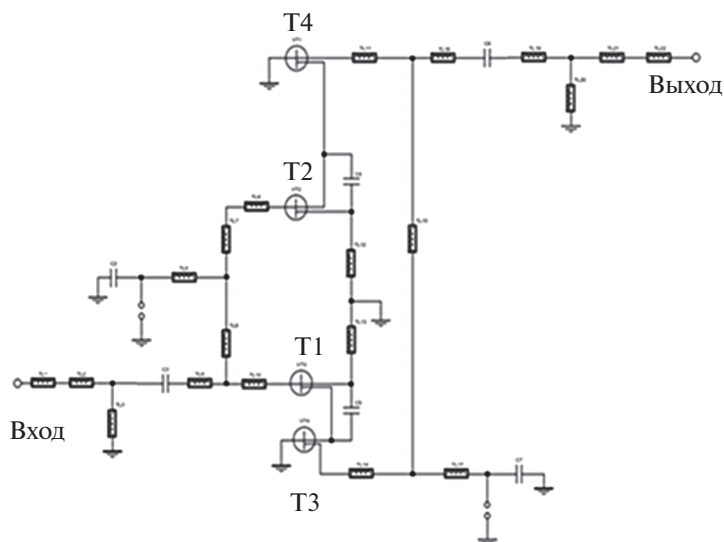


Рис. 1. Электрическая схема МИС УМ.

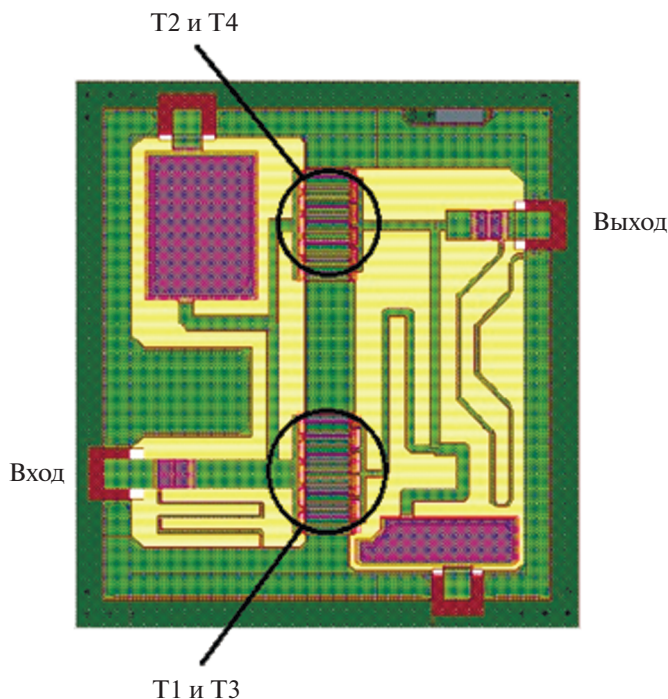


Рис. 2. Топологический проект МИС УМ.

Для работы в классическом непрерывном режиме усиления класса А без проявления короткоканальных эффектов транзисторы должны иметь аспектное соотношение длины затвора к толщине барьерного слоя $L_g/t_{bar} > 10-15$ [1, 2]. Использованные AlGaN/AlN/GaN гетероструктуры отечественного производства (ЗАО “Элма-Малахит”) на подложке карбида кремния (SiC) имели толщину барьерного слоя 14.7 нм и была выбрана

длина затворов транзисторов 0.25 мкм, что обеспечило аспектное соотношение 17, а для подложки сапфира (Al_2O_3) – толщина барьерного слоя 13.0 нм и аспектное отношение 19.

Проектирование усилителя производилось под разработанную в ИСВЧПЭ РАН технологию [3–10], заключающуюся в создании заземляющей плоскости над лицевой поверхностью пластины с уже изготовленными активными и пассивными

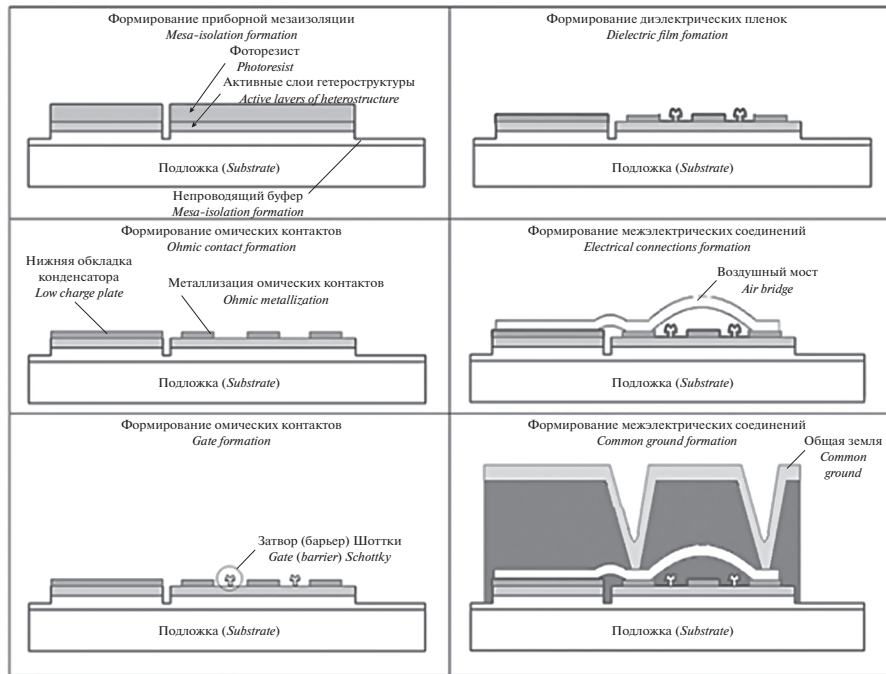


Рис. 3. Основные этапы технологического маршрута с металлизацией на лицевой стороне пластины.

СВЧ элементами поверх слоя полимерного диэлектрика толщиной 10–14 мкм, что позволяет избежать необходимости формирования сквозных отверстий в подложках SiC и Al₂O₃. Заземление элементов схемы выполняется через отверстия в слое диэлектрика. Конструктивно-технологический разрез МИС с металлизацией на верхнем слое пластины показан на рис. 3.

Ширина затворов выходного транзистора каскадной схемы составляет 10 × 160 мкм = 1.6 мм (3.2 для параллельно работающих каскадных схем), что обеспечивает плотность мощности примерно 1 Вт/мм на частоте 10 ГГц.

В табл. 1 приведены основные параметры на частоте 10 ГГц разработанных в ИСВЧПЭ РАН монолитных интегральных схем УМ на каскадных транзисторах с общей нагрузкой для двух типов подложек – сапфире (Al₂O₃) и карбиде кремния (SiC), а также ближайших зарубежных аналогов – трехкаскадным УМ TriQuint TGA2238 (производитель США) [11] на GaN/SiC и Sandramsemi SDC2016 (производитель Малайзия) [12] на GaAs.

В зарубежных МИС использованы сквозные отверстия в кристалле для отвода тепла от истока и стока на заземляющую плоскость с обратной поверхности пластины и эта конструкция является стандартной. Аналогичный конструктивно-технологический базис использован в транзисторе АО “Светлана-рост” на GaN/SiC [13]. Транзистор X-диапазона с проектной нормой длины

транзистора 0.25 мкм и суммарной периферией 4 × 150 = 600 мкм для обеспечения плотности мощности 4.6 Вт/мм и выходной мощности 2.7 Вт при КПД = 50%.

В ИСВЧПЭ РАН P_{вых} измерялась на зондовой станции без теплоотвода в импульсном режиме по питанию при скважности Q = 100 длительностью t = 1 мкс для обеспечения допустимого теплового режима при P_{потр} не более 10 Вт, а у американского аналога измерения проведены при Q = 10 и t = 100 мкс.

По расчетам при подаче напряжения питания 40 В и размещении в теплоотводящем корпусе МИС на подложке карбида кремния, разработанная в ИСВЧПЭ РАН, обеспечит на выходе мощность 4 Вт.

Важно подчеркнуть значительное уменьшение массогабаритных характеристик в 5–7 раз при изготовлении МИС с P_{вых} = 3 Вт в конструктивно технологическом базисе, разработанном ИСВЧПЭ РАН, по сравнению с зарубежными аналогичными усилителями мощности на подложке карбида кремния.

Кроме того, важно рассмотреть возможность замены дорогих карбид кремниевых подложек на дешевые отечественные сапфировые подложки, стоимость которых в 10 раз меньше для микропотребляющих УМ.

С этой целью в ИСВЧПЭ РАН были изготовлены МИС на нано гетеро структурах нитрида

Таблица 1. Сравнение технических характеристик МИС УМ

МИС (габариты)	$U_{\text{пит}}, \text{ В}$	$I_{\text{потр}}, \text{ мА}$	$P_{\text{вых max}}$		$K_{\text{po}}, \text{ дБм}$ ($P_{\text{вх}} = 10 \text{ дБм}$)	$K_{\text{pm}}, \text{ дБм}$ ($P_{\text{вх}} = 20 \text{ дБм}$)	$P_{\text{потр}}, \text{ Вт}$	КПД, %
			дБм	Вт				
GaN/Al ₂ O ₃ (1.8 × 1.9 мм) ИСВЧПЭ РАН	30	600	34.46	2.79	17.5	14.5	9	30.1
GaN/SiC (1.8 × 1.9 мм) ИСВЧПЭ РАН	20	600	32.96	1.98	18.1	12.5	6	33
	30	600	34.73	2.96	17.3	14.27	9	32.8
	40			4*				
GaN/SiC (5.49 × 7.0) TriQuint, США	28	650	36.02	4**	31	25	9	40
GaAs (3.2 × 5.8) Sandra-Semi, Малайзия	8	1300	36.99	5**				40
GaN/SiC (1.0 × 0.8) АО “Светлана-рост”	28	400		2.7		8	5.6	50

* Расчет.

** $P_{\text{вых}}$ при компрессии 1 дБ.Таблица 2. Значения параметров МИС УМ GaN/Al₂O₃

МИС	$U_{\text{пит}}, \text{ В}$	$I_{\text{потр}}, \text{ мА}$	$P_{\text{вых max}}$		$K_{\text{po}}, \text{ дБм}$ ($P_{\text{вх}} = 10 \text{ дБм}$)	$K_{\text{pm}}, \text{ дБм}$ ($P_{\text{вх}} = 20 \text{ дБм}$)	$P_{\text{потр}}, \text{ Вт}$	КПД, %
			дБм	Вт				
Сапфир (образец № 88) ИСВЧПЭ РАН	20	700	30.86	1.22	15.4	10.89	7	17.4
	30	700	32.66	1.85	15.4	12.88	10.5	17.6
	40	750	33.91	2.45	15.4	13.89	15	16.4
	50	750	34.79	3.01	15.4	14.69	18.75	16.0

галлия по одной технологии и одинаковых фотошаблонах на двух типах изолирующих подложек: карбиде кремния (производитель Китай) и сапфире (производитель Россия). Производитель наногетероструктур нитрида галлия – ЗАО “Элма-Малахит” (г. Зеленоград).

Из сравненных характеристик МИС табл. 1 видно, что выходная мощность нитрид-галлиевых МИС на отечественных подложках сапфира примерно на 5–10% меньше, чем на подложках карбида кремния, а стоимость МИС в 5–7 раз меньше, что является важным экономическим показателем для микропотребляемых усилительных модулей.

Зависимость выходной мощности и коэффициента усиления по мощности от входной мощ-

ности $P_{\text{вх}}$ приведены на рис. 4 для двух типов подложек: карбида кремния и сапфира. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) МИС приведены на рис. 5.

Представляет интерес рассмотреть влияние изменения напряжения в широком диапазоне на выходную мощность МИС на сапфировой подложке. Для этой цели экспериментальный образец был установлен на теплоотвод и исследован при максимальном напряжении питания 50 В.

В табл. 2 приведены значения параметров для образца МИС GaN/Al₂O₃ при напряжениях 20, 30, 40 и 50 В.

Из таблицы видно, что увеличение напряжения питания на каждые 10 В приводит к увеличению

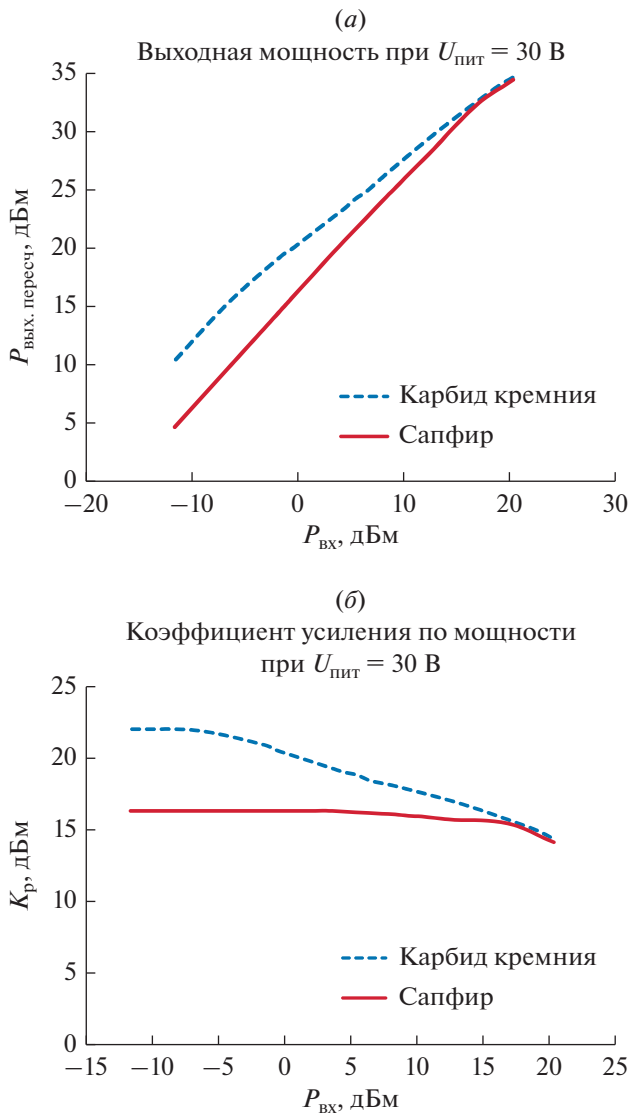


Рис. 4. Зависимость выходной мощности $P_{вых}$ (а) и коэффициента усиления K_p (б) GaN МИС от входной мощности $P_{вх}$ для двух типов подложки – карбида кремния и сапфира.

выходной мощности, примерно, на 0.6 Вт при изменении тока потребления в пределах 5–10%. При этом линейность растет с ростом $U_{пит}$, однако данный образец имеет низкий КПД 16–17% и выходную мощность ниже типичной.

Замена арсенида галлия на нитрид галлия позволяет создавать микропотребляющие усилительные модули с током потребления менее 1 А.

В ИСВЧПЭ РАН разработана технология изготовления МИС при напряжении питания 30 В на нитриде галлия с плотностью мощности 1 Вт/мм, которая аналогична МИС на арсениде галлия и позволяет использовать ранее применяемые материалы и технологические приемы. По данной технологии разработан комплект МИС серии

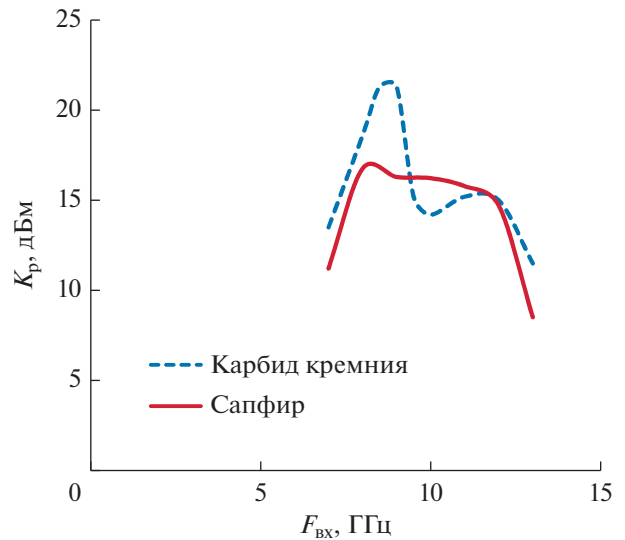


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) GaN МИС усилителей мощности диапазона частот 8–12 ГГц для двух типов подложек: карбида кремния и сапфира.

5411 [14] и прошедший необходимые испытания на надежность и безотказность.

ВЫВОДЫ

Разработанные в ИСВЧПЭ РАН МИС УМ на основе нитрид-галлиевых МИС при напряжении питания до 30 В в диапазоне частот 8–12 ГГц обеспечивают выходную мощность до 3 Вт на подложках карбида кремния, и занимают в 4–6 раз меньшую площадь кристалла, чем зарубежные.

Для микропотребляющих усилительных модулей с выходной мощностью до 3–4 Вт с кристалла при КПД 30–50%, соответственно, можно использовать подложку сапфира вместо карбида кремния для нитридных монолитных интегральных схем, практически, с незначительным ухудшением параметров до 10%, что значительно уменьшает стоимость кристаллов.

В ближайшей перспективе до 2025 г. для микропотребляющих усилителей мощности на нитрида галлия с выходной мощностью до 3–5 Вт с кристалла целесообразно перейти от дорогих подложек карбида кремния к более дешевым сапфировым для экстремальных условий применения и кремниевым для общепромышленного исполнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0011, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0011).

По результатам работы получены свидетельства на топологии интегральных микросхем МИС УМ и МШУ [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сечи Ф., Буджатти М.* Мощные и твердотельные СВЧ-усилители // Москва. Техносфера. 2015. 416 с.
2. *Мальцев П.П., Федоров Ю.В.* Современное состояние и перспективы развития нитридных СВЧ приборов миллиметрового диапазона за рубежом и в России // Интеграл. 2013. № 3. С. 25–29.
3. *Федоров Ю.В., Михайлович С.В.* Перспективы замены арсенидных МИС на нитридные // Нано- и микросистемная техника. 2016. Том 18. № 4. С. 217–226.
4. *Галиев Р.Р., Гнатюк Д.Л., Зуев А.В., Крапухин Д.В.* Нитридные технологии для освоения миллиметрового диапазона длин волн // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 2. С. 21–32.
5. *Павлов В.Ю., Павлов А.Ю.* Технологии формирования сплавных и несплавных омических контактов к гетероструктурам на основе GaN // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18. № 10. С. 635–644.
6. *Томаш К.Н., Павлов А.Ю., Павлов В.Ю., Хабибуллин Р.А.* Исследование процессов изготовления НЕМТ AlGaN/AlN/GaN с пассивацией Si₃N₄ *in situ* // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50. Вып. 10. С. 1434–1438.
7. *Павлов А.Ю.* Переход от сплавной к несплавной технологии омических контактов при росте диапазона рабочих частот СВЧ МИС на основе нитрида галлия // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 9. С. 541–550.
8. *Федоров Ю.В., Бугаев А.С., Павлов А.Ю., Гнатюк Д.Л.* Технология изготовления и разработка монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия // Нано- и микросистемная техника. 2017. № 5. С. 273–293.
9. *Климов Е.А., Лаврухин Д.В., Пушкарев С.С., Рубан О.А., Алешин А.Н.* Неразрушающие методы контроля арсенидных и нитридных гетероструктур с квантовой ямой // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 5. С. 302–316.
10. *Шаврук Н.В., Редькин С.В., Трофимов А.А., Иванова Н.Е.* Разделение полупроводниковых пластин из твердого материала на кристаллы // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 5. С. 317–320.
11. Triquint TGA2238 [Электронный ресурс] // TGA2238 8 – 11GHz 60W GaN Power Amplifier URL: <https://www.qorvo.com/products/p/TGA2238>. (Дата обращения: 16.11.2018).
12. Sandra-semi SDC2016 [Электронный ресурс] // SDC2016 8-12.5 GHz GaAs MMIC Power Amplifier URL: <http://sandra-semi.com/pdf/SDC2016.pdf>. (Дата обращения: 16.11.2018).
13. Get your GaN Here: RF GaN Foundry Survey. Microwave J., June 2016. P. 21–34.
14. [Электронный ресурс] Справочный лист комплекта монолитных интегральных схем на нитриде галлия для диапазона 57–64 ГГц серии 5411. URL: <http://isvch.ru/wordpress/wp-content/uploads/2016/03/list.pdf>
15. *Федоров Ю.В., Майтама М.В.* Топология ИМС “Интегральный усилитель мощности для диапазона частот 8–12 ГГц”, свидетельство о государственной регистрации № 2016630104 от 19 августа 2016 г.