



ГaN-МИКРОСХЕМЫ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ АФАР: ЕВРОПЕЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Применение активных фазированных антенных решеток (АФАР) в современных системах радиолокации и РЭБ непрерывно расширяется. Ряд стран уже демонстрируют возможности АФАР в бортовых системах вооружения самолетов F/A-18E/F (США), Rafale (Франция) и др. [1, 2]. Аналогичные работы проводятся и в РФ, где, как ожидается, АФАР войдет в состав РЛС истребителя пятого поколения [3]. Основные элементы АФАР высокочастотных диапазонов – СВЧ-приемопередающие модули (ППМ) на основе монолитных интегральных схем (МИС). Аналитические прогнозы рынка СВЧ-модулей для военной и космической аппаратуры показывают, что в ближайшие годы ППМ могут стать одними из наиболее массовых и востребованных изделий СВЧ-техники. Согласно оценкам, продажи ППМ в 2009 году достигнут 1,3 млрд. долл., а систем с АФАР за период 2009–2015 годы возрастут с 6 млрд. до 13 млрд. долл. При этом сегмент рынка бортовых АФАР на два порядка превысит сегмент рынка АФАР наземного и корабельного назначения [4]. Поэтому сегодня обеспечение РЛС с АФАР приемопередающими модулями – приоритетная задача мировой СВЧ-промышленности. До последнего времени ППМ строились на основе GaAs СВЧ-микросхем. В рамках развернутых в США и Европе двух крупных программ по исследованиям нитрида галлия (WBGSTI и KORRIGAN) начались разработки ППМ следующего поколения – на основе этого материала. В США наряду с демонстрацией и испытаниями на надежность уже выполняются поставки GaN-модулей для военной аппаратуры, в том числе для РЛС стратегической системы ПРО [5, 6]. Чтобы сократить отставание от США, европейские компании предпринимают энергичные меры по развитию технологии GaN-микросхем для ППМ [7, 8].

И. Викулов, к.т.н.,
член Европейской СВЧ-ассоциации

GAN МИС-КОМПОНЕНТЫ ППМ ЕВРОПЕЙСКИХ КОМПАНИЙ

Мощность ППМ на нитриде галлия на порядок выше, чем у арсенидгаллиевых устройств. Поэтому АФАР, реализованные на основе таких ППМ, будут иметь либо большую объемную пространственную зону поиска, либо большую дальность сопровождения цели, либо, при прочих равных условиях, существенно меньшую апертуру [9]. При этом GaN ППМ более устойчивы к повышенной температуре и имеют более высокий КПД. В состав ППМ входят несколько МИС, в том числе маломощные усилители, предварительные усилители мощности, мощные выходные усилители, переключатели и др. По оценкам компании Thales (Франция), на ППМ и входящие в них МИС приходится около половины стоимости всей АФАР (рис.1) [2]. Рассмотрим разработки GaN МИС-компонентов ППМ европейских компаний, представленные на конференции European Microwave Week, которая проходила в октябре 2008 года в Амстердаме (Нидерланды).

GaN МИС-усилители – ключевые компоненты ППМ. Наибольший интерес вызывают следующие устройства, созданные европейскими фирмами.

Комплект микрополосковых МИС-усилителей X-диапазона для ППМ, в который вошли предварительный усилитель, усилитель мощности и маломощный усилитель. Комплект разрабатывался совместными усилиями отделения электроники военного назначения компании EADS Deutschland GmbH (г.Ульм) и Института прикладной физики твердого тела Фраунгофера (г. Фрайбург), Германия [10]. При этом GaN МИС изготавливались специалистами Института Фраунгофера, тогда как их проектирование и измерение характеристик прово-

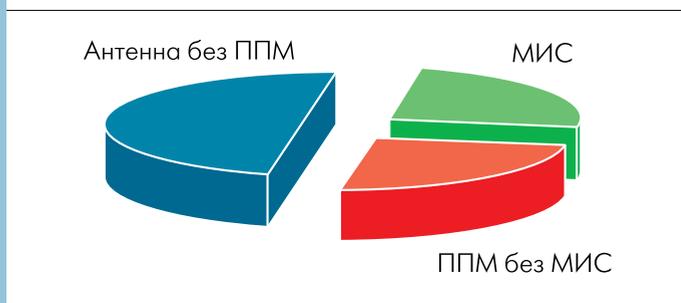


Рис. 1. Относительная стоимость составляющих частей АФАР с GaAs ППМ

дились отделением электроники военного назначения компании EADS. AlGaIn/GaN HEMT-структуры изготавливались на подложках карбида кремния диаметром 75 мм методом химического осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений (MOCVD-методом). Затвор длиной 0,25 мм и полевой электрод транзисторов формировались с помощью электронно-лучевой литографии. SiC-подложка после обработки ее верхней поверхности утонялась до 100 мкм, после чего с ее обратной стороны выполнялись сквозные отверстия.

Результаты. Первый каскад предварительного усилителя образует транзистор с шириной затвора 8×60 мкм, второй каскад – транзистор с шириной затвора 8×125 мкм. По входу и выходу усилитель согласован с импедансом 50 Ом. Максимальная выходная мощность достигнута в режиме насыщения при компрессии усиления 5 дБ и превышает 38 дБмВт. Но даже при компрессии 1 дБ выходной мощности усилителя достаточно для запитки одного или двух мощных усилителей в диапазоне 8,5–14 ГГц (рис.2).

В каждом из двух каскадов мощного выходного усилителя установлены транзисторы с одинаковой шириной затвора 8×125 мкм: в первом каскаде два транзистора, во втором – четыре. Выходной сумматор усилителя оптимизирован на максимальную выходную мощность в интервале частот от 8,5 до 11 ГГц (рис.3).

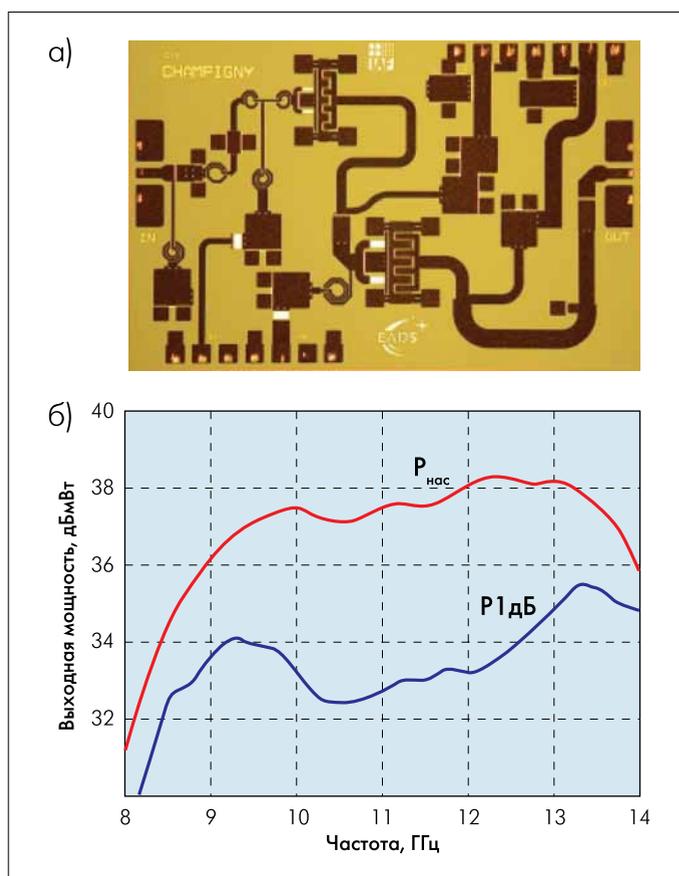


Рис.2. МИС GaN предварительного усилителя ППМ: вид микросхемы на кристалле размером 3×2 мм (а); частотные характеристики при напряжениях стока $U_c = 30$ В и затвора $U_g = -4,9$ В (б)

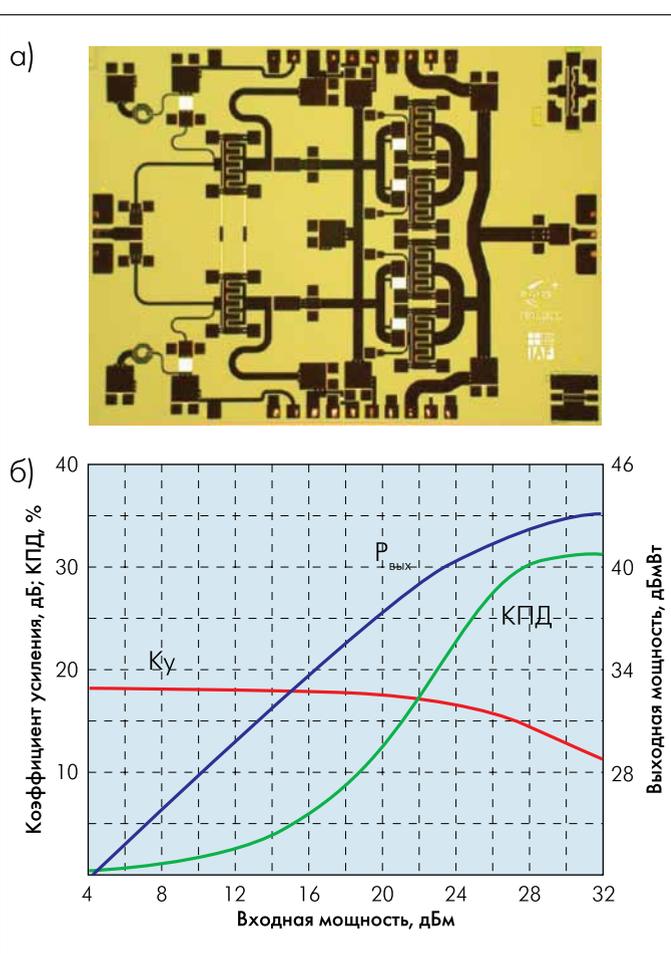


Рис.3. МИС GaN выходного усилителя ППМ: вид микросхемы на кристалле размером 4×3 мм (а); характеристики на частоте 11 ГГц при $U_c = 30$ В и $U_g = -5$ В (б)

При работе усилителя мощности в классе АВ его максимальная выходная мощность равна 20 Вт, что соответствует удельной мощности транзистора 5,7 Вт/мм. В этом случае коэффициент усиления в режиме малого сигнала составляет 18 дБ, а КПД – 31%. В диапазоне частот 8,5–11 ГГц коэффициент усиления в режиме малого сигнала – не менее 15 дБ. Во всем диапазоне частот от 8,75 до 11,5 ГГц измеренная выходная мощность усилителя превышает 14 Вт.

Маломощный усилитель (МШУ) также образован двумя каскадами на основе транзисторов размером 8×30 мкм. Минимальный измеренный коэффициент шума отдельного маломощного AlGaIn/GaN HEMT не превышал 0,8 дБ на частоте 10 ГГц и при напряжении стока (U_c) 10 В. Вид микросхемы и измеренные характеристики GaN маломощного усилителя представлены на рис.4. Минимальный коэффициент шума МШУ составляет 1,45 дБ, мощность насыщения – 24 дБмВт при уровне входной мощности 16 дБмВт. Важной характеристикой любого МШУ является максимально возможный уровень мощности на входе. Рассматриваемый усилитель устойчиво работал вплоть до уровня входной мощности 4 Вт. Однако при этом его выходная мощность существенно снижалась из-за изменения смещения транзистора первого каскада.

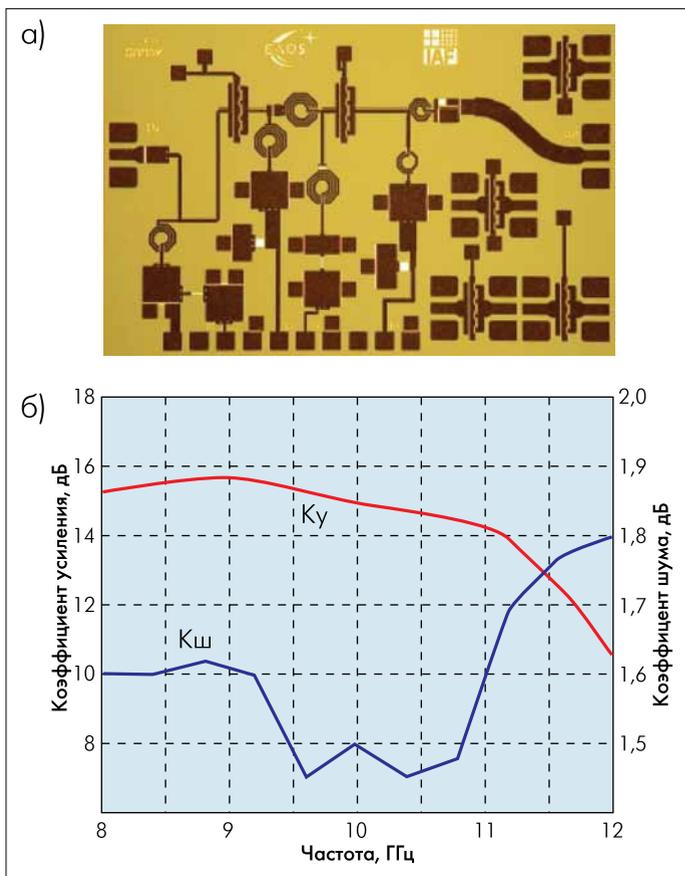


Рис.4. МИС GaN малошумящего усилителя ППМ:
а) вид микросхемы на кристалле размером 3×2 мм;
частотные характеристики при $U_c = 15$ В и $U_3 = -3,5$ В (б)

Модуль ППМ был собран на базе трех разработанных GaN МИС-усилителей с использованием промышленной технологии многослойной низкотемпературной керамики LTCC. Передающий блок выполнен на основе одного предварительного усилителя, двух параллельно включенных мощных усилителей и циркулятора. Усилители смонтированы на теплоотводе из сплава CuMo. Приемный блок включал малошумящий усилитель и ограничитель. Для переключения каналов использовался GaAs-переключатель. На многослойной LTCC-подложке также монтировались импульсные схемы питания мощных GaN МИС на напряжение 30 В, схемы смещения МШУ и управляющая схема переключателя (рис.5).

Полученные результаты показывают возможность реализации GaN-приемопередающих модулей АФАР с выходной мощностью в режиме передачи более 20 Вт и коэффициентом шума приемного канала менее 3 дБ.

GaN МИС-усилитель X-диапазона с выходной мощностью 20 Вт для перспективных РЛС с АФАР [11]. Усилитель разработан совместными усилиями компаний SELEX Sistemi Integrati и Consorzio OPTEL, а также Университета Рима и Политехнического института Турина (Италия). МИС с микрополосковой структурой выполнена на GaN HEMT компании SELEX Sistemi Integrati. Эпитаксиальные структуры GaN/AlGaIn/GaN выращивались на полуизолирующих под-

ложках SiC либо MOCVD-методом, либо с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ-методом). Затвор транзисторов длиной 0,5 мкм формировался методом ступенчатой фотолитографии. Омические контакты получали путем осаждения на эпитаксиальный слой GaN/AlGaIn структуры Ti/Al/Ni/Au с последующим ее отжигом при высокой температуре. МИС пассивировалась пленкой SiN, наносимой методом плазмохимического осаждения. После создания активных приборов наносились тонкопленочные NiCr-резисторы, гальванически сформированные индуктивности, линии передачи и, при необходимости, воздушные мосты. Затем пластина утонялась до 70 мкм, и с ее обратной стороны с помощью процесса сухого травления индуцируемой плазмой формировались сквозные отверстия, поверхность которых покрывалась слоем золота толщиной 10 мкм методом гальванической металлизации.

Усилитель состоит из двух транзисторных каскадов. Транзистор первого каскада содержит четыре транзисторные ячейки, транзистор второго каскада – восемь ячеек. Общая ширина затворов транзисторов каскадов составляет 4 и 8 мм соответственно. Размер затвора отдельной транзисторной ячейки – 10×100 мкм. Усилитель спроектирован на диапазон частот 8,5–10,5 ГГц.

Результаты. Вид микросхемы и характеристики усилителя приведены на рис.6. Характеристики усилителя на пластине измерялись в импульсном режиме при коэффициенте заполнения импульса 1%, длительности импульса 10 мкс, напряжении стока 20 В в режиме класса АВ. Вы-

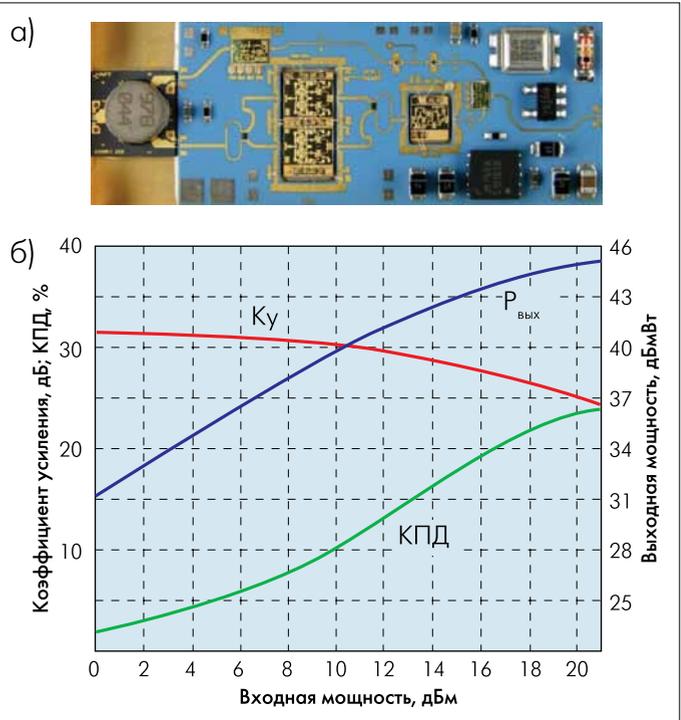


Рис.5. ППМ с тремя GaN МИС-усилителями на многослойной LTCC-подложке: устройство в сборке (а); характеристики в импульсном режиме на частоте 11 ГГц при $U_c = 30$ В и $U_3 = -5$ В (б)

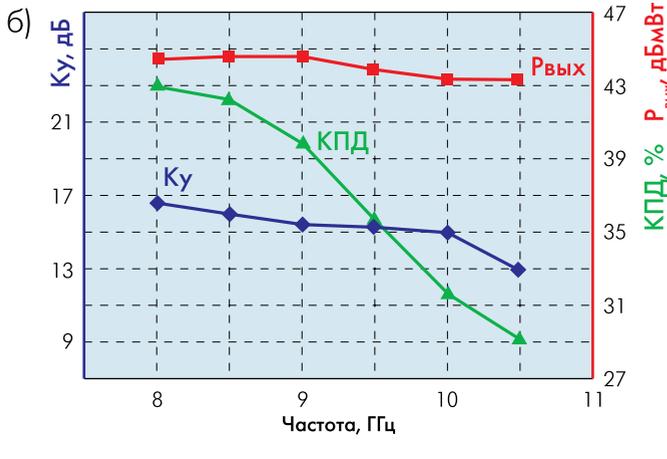
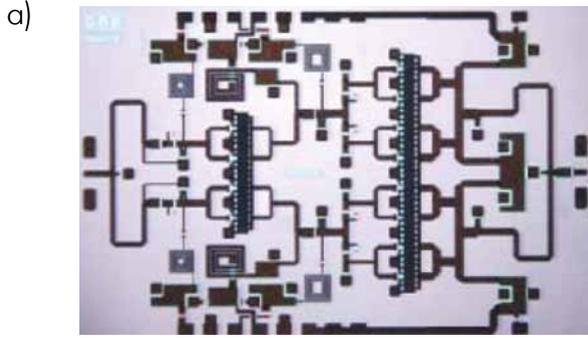


Рис.6. МИС двухкаскадного GaN-усилителя с выходной мощностью 20 Вт: вид микросхемы на кристалле размером 5,33×3,5×0,07 мм (а); частотные характеристики в импульсном режиме $T_{\text{имп}} = 10$ мкс, $K_3 = 1\%$, $U_c = 20$ В, $I_{\text{покоя}} = 1,8$ А (б)

ходная мощность усилителя в полосе частот 8–10,5 ГГц составляла 21–28,5 Вт при усилении 12,9–16,5 дБ и КПД 29–43%. В точках 8,5 и 9 ГГц мощность в насыщении достигала 30 Вт при КПД 40%.

Мощные AlGaIn/GaN HEMT и МИС-усилители диапазонов L/S (1–4 ГГц) и X (8–12 ГГц) [12]. Транзисторы и МИС разработаны совместными усилиями Института прикладной физики твердого тела Фраунгофера (Фрайбург) и компаний United Monolithic Semiconductors (Ульм), Германия, и NXP Semiconductors (г. Ниймеген, Нидерланды).

Гетероструктуры GaN/AlGaIn выращивались на SiC-подложке MOCVD-методом в реакторе, позволяющем одновременно обрабатывать 12 пластин диаметром 75 мм. Длина затворов транзисторов МИС составляет 0,25 мкм. Кроме того, в структуре использованы дополнительные оптимизированные электроды полевой модуляции. Напряжение пробоя HEMT по двум электродам превышает 100 В.

Для оценки качества GaN HEMT были измерены характеристики 21 транзисторной ячейки на каждой из пяти пластин (табл.1).

Результаты. Выходная мощность двухкаскадного усилителя X-диапазона превышает 11 Вт на частоте 8,56 ГГц при КПД 40% и усилении 17 дБ при компрессии 3 дБ (рис.7). Выходная мощность однокаскадного МИС-усилителя на частоте

те 8,24 ГГц при напряжении 20 В составляет 6 Вт, КПД – 55% и линейное усиление – 12 дБ.

Следует также отметить результаты, полученные в диапазоне 2 ГГц для мощных HEMT, предназначенных для систем мобильной связи. Так, при напряжении 50 В средняя удельная мощность транзистора была равна 10 Вт/мм при КПД 61,3% и линейном усилении 24,4 дБ. На этой частоте транзисторы устойчиво работали и при повышенном напряжении, равном 100 В. В этом случае удельная мощность транзистора достигала 25 Вт/мм при КПД $\geq 60\%$.

GaN МИС-усилители диапазона 2–6 ГГц для систем РЭБ [13]. Усилители разработаны специалистами По-

Таблица 1. Усредненные параметры 21 транзисторной ячейки, измеренные методом подвижной нагрузки на частоте 10 ГГц в непрерывном режиме при напряжении стока 28 В

Номер пластины	Среднее значение по пластине		
	Удельная мощность, Вт/мм	Линейное усиление, дБ	КПД, %
1	4,5	16	51,5
2	4,75	15,9	54,6
3	4,5	15,7	53,8
4	5	15,2	54
5	5	15	53,1

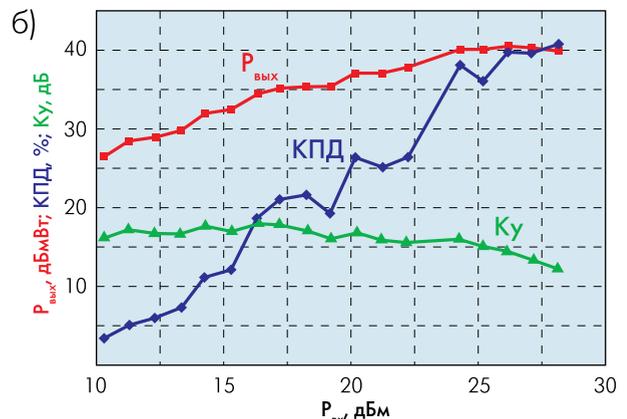
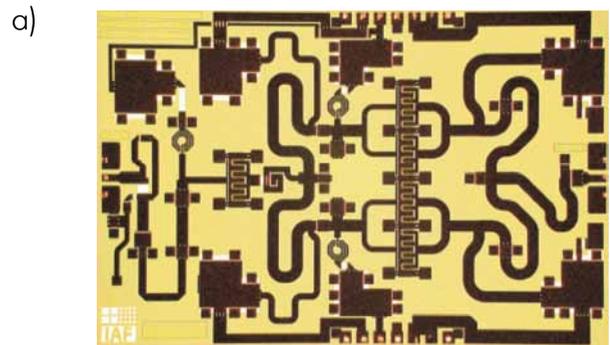


Рис.7. МИС двухкаскадного GaN-усилителя с выходной мощностью более 11 Вт: вид микросхемы на кристалле размером 4,5×3 мм (а); характеристики в импульсном режиме класса АВ на частоте 8,56 ГГц при $U_c = 20$ В и $U_3 = -3,5$ В (б)

Таблица 2. Конструктивно-технологические особенности, используемые при изготовлении двух типов широкополосных GaN МИС-усилителей

Параметр	Компания	
	SELEX	QinetiQ
Конструкция	Микрополосковая	Копланарная
Толщина подложки, мкм	85	400
Технология изготовления затвора	Степнерная фотолитографии	Электронно-лучевая литография
Длина затвора, мкм	0,5	0,25
Ширина затвора транзистора, мкм	10×100	8×125
Ток насыщения, мА/мм	950	900
Проводимость, мС/мм	120	220

литехнического университета Мадрида, компаний INDRA Sistemas (Мадрид), Испания, SELEX Sistemi Integrati (Рим), и QinetiQ (г. Малверн, Великобритания).

В ходе работ две компании параллельно разрабатывали две разные конструкции усилителей: микрополосковый вариант на базе технологии компании SELEX и копланарную конструкцию на базе технологии компании QinetiQ (табл.2). Благодаря тому, что импеданс GaN HEMT больше, чем у GaAs HEMT, их согласование в выбранной для проектирования усилителей широкой полосе частот 2–6 ГГц упрощается. Оба усилителя работали в режиме класса АВ и имели два усилительных кас-

када. Необходимая мощность выходного каскада каждого усилителя достигалась путем сложения выходных сигналов четырех транзисторов с шириной затвора 1 мм.

Результаты. Микросхемы обоих типов мощных широкополосных усилителей и их характеристики приведены на рис.8 и 9. В целом частотные характеристики усилителя компании QinetiQ соответствовали расчетным за исключением диапазона 4–6 ГГц, где наблюдалось небольшое отклонение (на 1–2 дБ) выходной мощности (8 Вт) от расчетного значения. Хорошее соответствие было получено и для коэффициента усиления в режиме малого сигнала (18 дБ) и КПД (20%) [13].

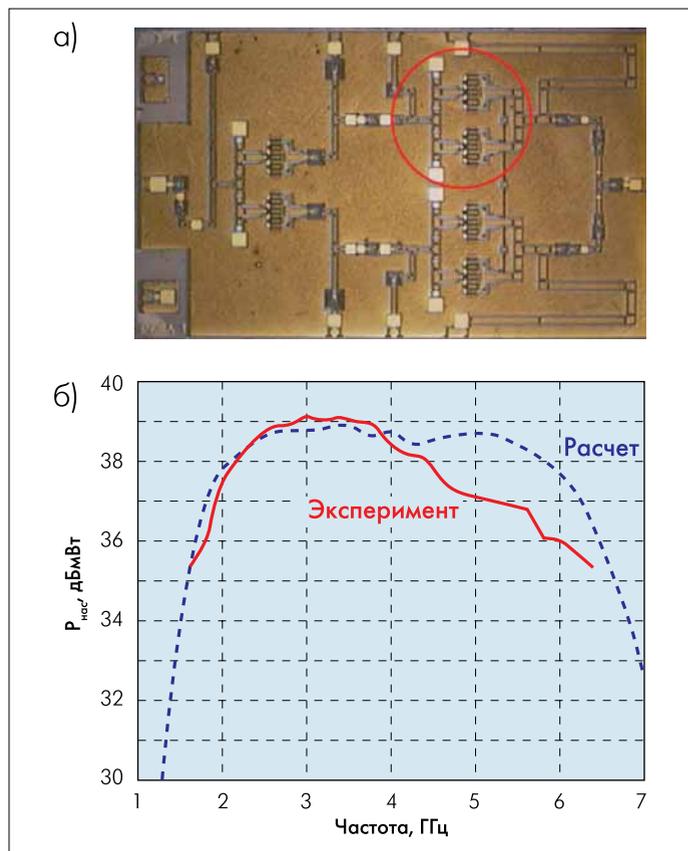


Рис.8. МИС мощного широкополосного усилителя копланарной конструкции компании QinetiQ с P_{макс} = 8 Вт: вид микросхемы на кристалле размером 6,3×7,5 мм (а); частотная зависимость мощности насыщения при U_с = 20 В и U_з = -4 В (б)

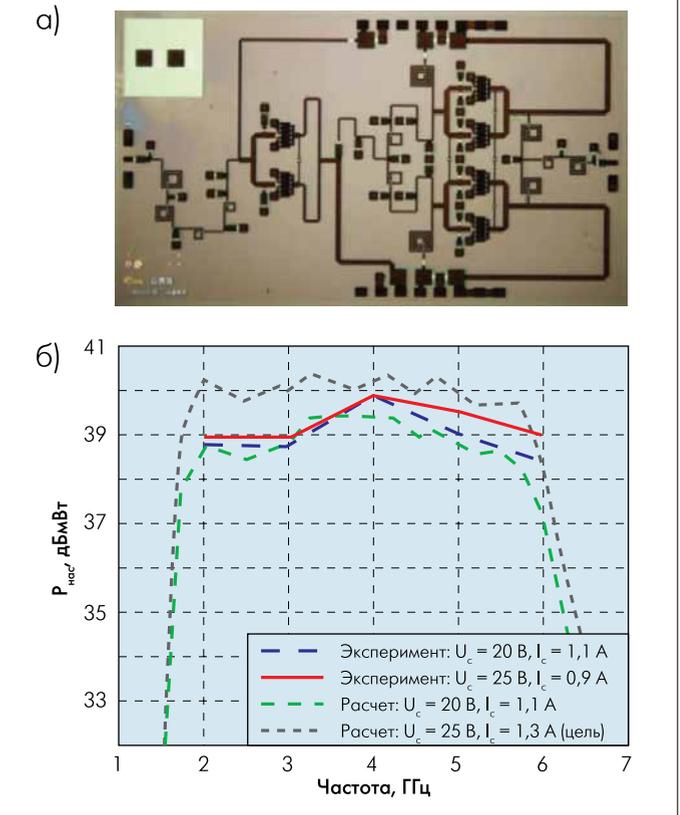


Рис.9. МИС широкополосного усилителя микрополосковой конструкции компании SELEX : вид микросхемы на кристалле размером 6,4×3,6 мм (а); частотные зависимости мощности насыщения (б)

Усилитель компании SELEX проектировался в расчете на выходную мощность 10 Вт при напряжении 25 В и токе 1,3 А. Характеристики измерялись при значениях напряжения 20 и 25 В и токах 1,1 и 0,9 А соответственно (см. рис.9). Измеренный коэффициент усиления в режиме малого сигнала во всей полосе 2–6 ГГц превышал 15 дБ. Выходная мощность насыщения в непрерывном режиме достигала 10 Вт и КПД – более 25% при напряжении 20 В на частоте 4 ГГц. На этой частоте в импульсном режиме (длительность импульса 20 мкс, коэффициент заполнения 1,1 %) мощность усилителя составляла 17 Вт [13].

GAN МИС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

Высокое рабочее напряжение GaN-транзисторов дает им значительные преимущества и при работе в составе пере-

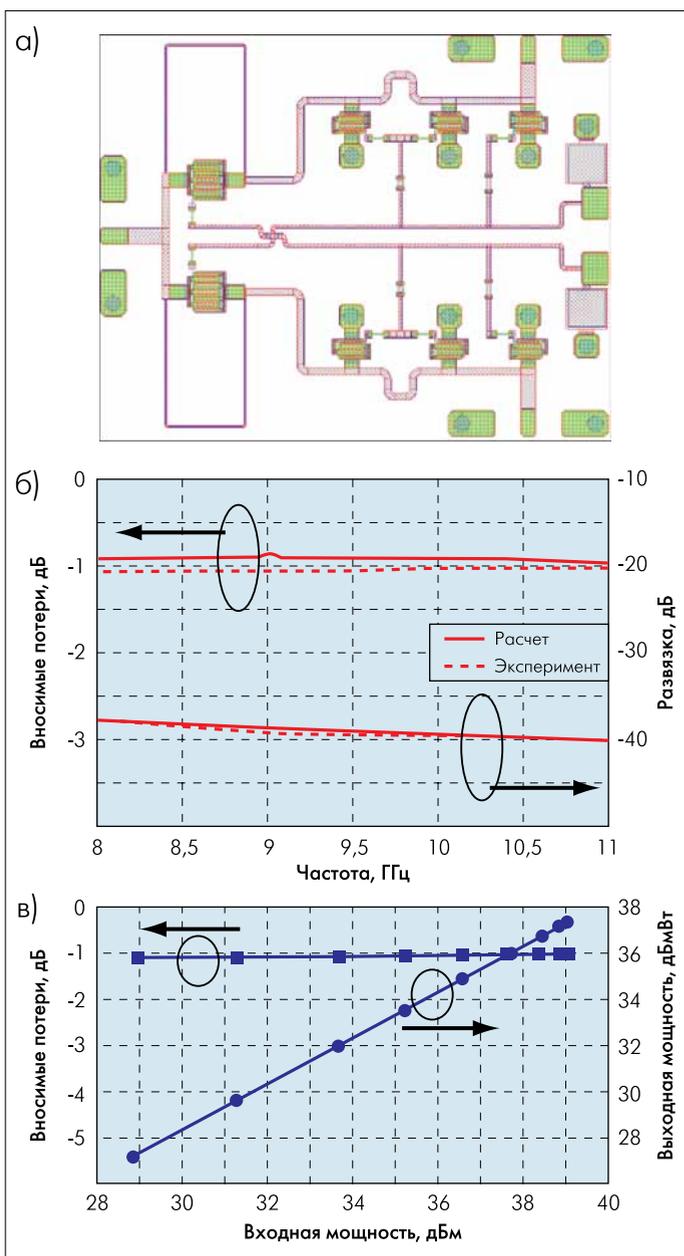


Рис. 10. Микрополосковый GaN SPDT переключатель X-диапазона: вид микросхемы на кристалле размером 2,4×1,9 мм (а); частотные характеристики (б); характеристики на частоте 9 ГГц при напряжении стока -20 В (в)

ключателей приемопередающих модулей. При использовании GaN-транзисторов число последовательно включенных транзисторных каскадов может быть уменьшено по сравнению с GaAs-переключателями [14]. В некоторых случаях из схем модуля можно исключить циркулятор [15].

Мощные микрополосковые СВЧ-переключатели на GaN HEMT на диапазоны 8–12 и 2–18 ГГц [14]. Переключатели разработаны совместными усилиями компаний Elettronica SpA, SELEX Sistemi Integrati, CNR-IFN и Университета Tor Vergata (Рим, Италия). Переключатели построены по схеме SPDT (один вход, два выхода) с помощью микрополосковой GaN HEMT-технологии компании SELEX. Эпитаксиальные структуры GaN/AlGaIn/GaN выращивались на полуизолирующих

SiC-подложках методом MOCVD либо MBE-методом. При работе с масками разных уровней использовались как ступенчатая фотолитография, так и электронно-лучевая литография. Затворы длиной 0,25 мкм формировались с помощью электронно-лучевой литографии. Остальные технологические операции изготовления МИС переключателей те же, что при создании МИС-усилителей компании SELEX.

Результаты. Разработанный переключатель X-диапазона и его характеристики представлены на рис.10. Вносимые потери переключателя менее 1 дБ в заданном диапазоне частот 8–11 ГГц, развязка более 37 дБ (рис.10б). При этом согласование переключателя по выходу лучше 13 дБ. Для измерения характеристик переключатель монтировался в специальную оправку с коаксиальными выводами. Измерения проводились в импульсном режиме (длительность импульса – 100 мкс, коэффициент заполнения – 25%). Даже при подаче на вход сигнала мощностью 8 Вт переключатель сохранял линейность передаточной характеристики (рис.10в).

В рамках этой же работы создан широкополосный переключатель на диапазон 2–18 ГГц с вносимыми потерями не более 2,2 дБ, развязкой лучше 25 дБ и передаваемой мощностью в точке компрессии 1 дБ более 5 Вт.

GaN SPDT МИС-переключатель X-диапазона с уровнем рабочей мощности более 25 Вт [15]. Это раз-

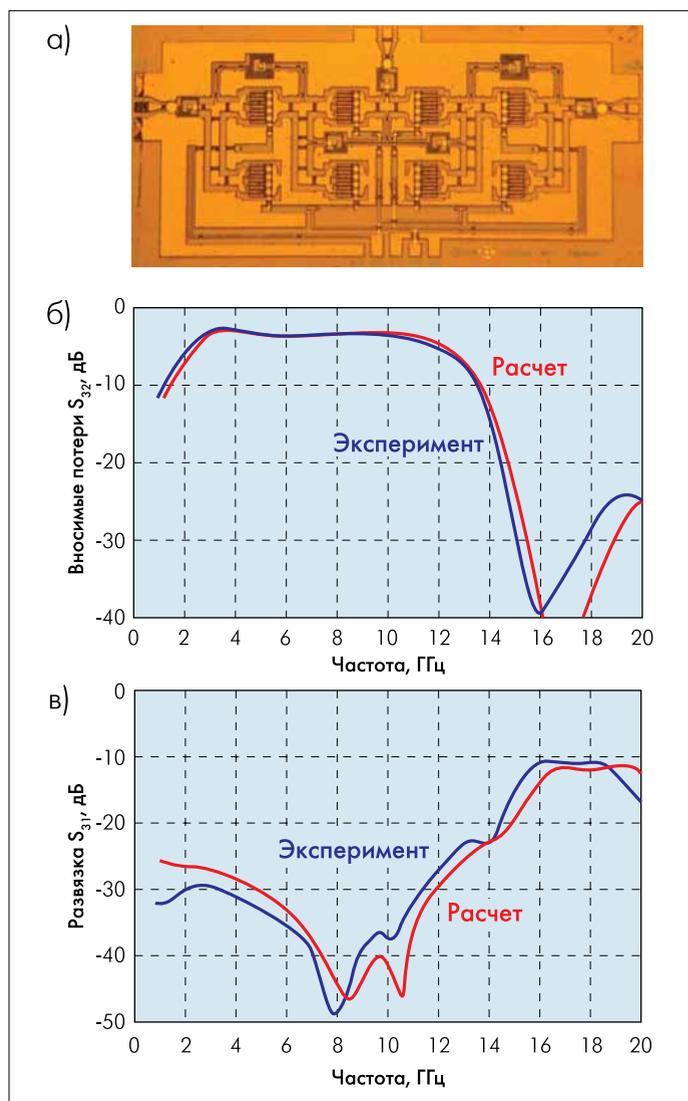


Рис. 11. Копланарный GaN SPDT переключатель X-диапазона: вид микросхемы на кристалле размером 4×1,8 мм (а); частотная зависимость вносимых потерь (б); частотная зависимость развязки (в)

работка компаний TNO Defence, Security and Safety (г. Ден Хааг, Нидерланды) и QinetiQ (Малверн, Великобритания). Микросхемы переключателя изготавливались по копланарной GaN МИС-технологии компании QinetiQ. В состав структуры входит нелегированный слой $Al_{0,25}Ga_{0,75}N$ толщиной 25 нм на изолирующем легированном железом слое GaN толщиной 1,9 мкм, выращенном на полуизолирующей подложке 4H SiC диаметром 50 мм.

Омические контакты Ti/Al/Pt/Au и T-образный затвор Ni/Au длиной 0,25 мкм формировались обычными методами. Приборы пассивировались многослойной структурой $SiN_x/SiO_2/SiN_x$ с пробивным напряжением более 200 В, которая одновременно служила диэлектриком конденсаторов со структурой металл-изолятор-металл (MIM). Тонкопленочные резисторы выполнялись на пленке NiCr с поверхностным сопротивлением 27 Ом/кв. Индуктивности и копланарные линии создавались в гальваническом слое золота толщиной 3 мкм. Воздушные перемычки сформированы из напыленного слоя золота толщиной 0,8 мкм.

Проводимость транзисторов составляла 230 мС/мм, ток – 1030 мА/мм, предельная частота усиления по току – 40 ГГц и пробивное напряжение затвора – более 100 В. Проектирование переключателей выполнено с помощью программы ADS Momentum.

Результаты. Схема переключателя и его характеристики приведены на рис.11. Получен достаточно высокий уровень развязки (35 дБ в X-диапазоне). Обратные потери по входу и выходу лучше 10 дБ. Вносимые потери большие (3,5 дБ) из-за относительно низкой развязки транзисторов в выключенном состоянии. Измерения в импульсном режиме показали линейную зависимость выходной мощности переключателя от входной вплоть до значений 25 Вт. При этом однородный характер развязки сохраняется во всем динамическом диапазоне.

В настоящее время близится к завершению проект Европейского оборонного агентства KORRIGAN (2005–2009 годы), направленный на развитие GaN СВЧ-приборов и микросхем [8]. Его главным результатом стало создание европейской инфраструктуры, в которую входят самостоятельные технологические центры по производству GaN СВЧ МИС гражданского (базовые станции сотовой связи) и военного (приемопередающие модули АФАР) назначения. В разработке GaN-компонентов МИС приемопередающих модулей участвуют европейские промышленные компании и вузы при поддержке оборонных министерств отдельных стран (Франции, Германии, Испании).

Полученные результаты подтверждают перспективность применения GaN МИС в составе приемопередающих модулей как в мощных каскадах (предварительные и выходные усилители, переключатели), так и в маломощных (малошумящие усилители). GaN МИС демонстрируют хорошие широкополосные характеристики при высоком уровне выходной мощности. Дальнейшее применение GaN приемопередающих модулей в конкретных АФАР будет зависеть от степени готовности промышленной технологии GaN МИС и компаний-разработчиков соответствующих РЛС. До настоящего времени над проектами АФАР для бортовых РЛС европейских истребителей работали две группы компаний. Одну из них возглавляет компания Thales, разрабатывающая решетку из 1000 модулей, вторую образует консорциум в составе компаний SELEX Galileo, EADS Electronics и INDRA, проектирующий АФАР с 1425 модулями [7].

Автор признателен Ю.В.Кузнецову, К.П.Кирдяшеву и Н.А.Кичаевой за поддержку, оказанную при подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brookner. E. Phased-array Radars: Past, Astounding Breakthroughs and Future Trends.– Microwave Journal, 2008, v.51, №1, p.30.

2. **Mancuso Y.** Thales Components and Technologies for T/R Modules.– Proceedings of the 3rd European Microwave Integrated Circuits Conference. Amsterdam, Oct. 2008, p.270.
3. www.RG.RU, 2008, №227, с.14.
4. Growing Market for Active Electronically Scanned Arrays (AESAs).– Microwave Journal, 2009, v.52, N7, p.47.
5. Raytheon Demonstrates Gallium Nitride Advantages in Radar Components.– Microwave Journal, 2008, v.51, №6, p.48.
6. Microwave Journal, 2008, v.51, №10, p.62.
7. **Mumford R.** Microwaves in Europe: Historical Milestones and Industry Update.– Microwave Journal, 2008, v.51, №10, Part II, p.88.
8. **Викулов И., Кичаева Н.** GaN-технология: новый этап развития СВЧ-микросхем.— ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, №4, с.80–85.
9. **Russel M.E.** Future of the RF Technology and Radars.– Proceedings of the IEEE Radar Conference, 2007, p.11.
10. **Schuh P. et al.** GaN MMIC Based T/R-Module Front-End for X-band Applications. – Proceedings of the 3rd European Microwave Integrated Circuits Conference. Amsterdam, Oct. 2008, p.274–277.
11. **Costrini C. et al.** A 20 Watt Micro-strip X-band AlGaIn/GaN HPA MMIC for Advanced Radar Applications.– Proceedings of the 38th European Microwave Conference. Amsterdam, Oct. 2008, p.1433.
12. **Quay R. et al.** Efficient AlGaIn/GaN HEMT Power Amplifiers.– Proceedings of the 3rd European Microwave Integrated Circuits Conference. Amsterdam, Oct. 2008, p.87.
13. **Gonzalez-Garrido M. et al.** 2–6 GHz GaN MMIC Power Amplifiers for Electronic Warfare Applications.– Proceedings of the 3rd European Microwave Integrated Circuits Conference. Amsterdam, Oct. 2008, p.83–86.
14. **Alleva V. et al.** High Power Microstrip GaN-HEMT Switches for Microwave Applications.– Proceedings of the 3rd European Microwave Integrated Circuits Conference. Amsterdam, Oct. 2008, p.194–197.
15. **Jansen J. et al.** X-band GaN SPDT MMIC with over 25 W Linear Power Handling.– Proceedings of the 3rd European Microwave Integrated Circuits Conference. Amsterdam, Oct.2008, p.190–193.