

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ТРАНЗИСТОРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ СВЧ ДИАПАЗОНА – СМЕНА ПОКОЛЕНИЙ

А. Кищинский
ak@mwsystems.ru

В совершенствовании конструкций СВЧ усилителей мощности на основе транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС), а также в развитии необходимых для этого полупроводниковых технологий в течение последних десятилетий вкладывались значительные средства и интеллектуальные силы ведущих мировых электронных компаний и университетов. Этот класс устройств во многих радиотехнических системах определяет важнейшие тактико-технические параметры системы, такие, как излучаемую и потребляемую мощность, ширину полосы рабочих частот, габариты и массу, надежность и стоимость. Твердотельные СВЧ усилители мощности вообще, а широкополосные приборы в особенности, часто являются «критическим звеном» аппаратуры, возможность реализации параметров которого позволяет (либо не позволяет) реализовать систему в целом. В настоящей работе рассмотрены мировой уровень и направления развития специфической, но очень интересной группы СВЧ усилителей - широкополосных транзисторных усилителей мощности непрерывного режима.

Специфика предмета

К категории широкополосных усилителей будем относить приборы, имеющие относительную ширину полосы рабочих частот более 40% (перекрытие по частоте - отношение верхней и нижней границ диапазона от 1,4:1 и более, вплоть до нескольких декад). От своих более узкополосных собратьев широкополосные приборы отличаются следующими конструктивными особенностями:

- сложная схема построения выходного каскада. Возможности широкополосного согласования активного элемента (транзистора) существенно ухудшаются с ростом его выходной мощности (и как следствие – ширины затвора, емкостей активной структуры), что часто приводит к необходимости применения многоканальных сумматоров мощности, усложняющих конструкцию прибора и вносящих дополнительные потери.

- использование в качестве активных элементов транзисторов с малыми дополнительными реактивностями (кристаллов дискретных транзисторов и МИС в средней и верхней части сантиметрового диапазона и МИС в миллиметровом диапазоне, и корпусных транзисторов в дециметровом и нижней части сантиметрового диапазона).

- необходимость применения дополнительных мер (и схем) подавления отраженных волн. При согласовании в широкой полосе невозможно получить низкий уровень отраженной от входа транзистора волны использованием реактивных согласующих цепей (СЦ). Приходится применять схемные «излишества» в виде реактивно-диссипативных СЦ, уменьшающих усиление каскада, обратных связей, ухудшающих и усиление, и выходную мощность, и КПД каскада, квадратурных схем сложения, увеличивающих габариты и усложняющих конструкцию прибора, схем распределенного усиления, ухудшающих КПД.

Названные особенности приводят к тому, что электрические параметры широкополосных приборов оказываются заметно хуже таковых у узкополосных усилителей, а габариты и стоимость – заметно (иногда в разы) выше.

Тем не менее, имеется целый ряд систем, в которых применение широкополосных усилителей необходимо. Это системы радиоэлектронного подавления (РЭП), сверхширо-

кополосная локация, аппаратура тестирования на электромагнитную совместимость, специальные системы передачи данных, измерительная техника.

В силу своей сложности, широкополосные усилители мощности являются и определенным «двигателем» полупроводниковых технологий в попытках создать все более мощные и широкополосные интегральные «кирпичики» для построения этих приборов.

«Кирпичики»

Из имеющегося спектра современных полупроводниковых технологий и материалов [1,2] при промышленном производстве мощных СВЧ дискретных и монолитных компонентов непрерывного режима, пригодных для использования в широкополосных усилителях используются следующие (таблица 1):

Таблица 1 Промышленные технологии мощных СВЧ транзисторов и МИС

Технология	Типы компонентов	Диапазон частот, ГГц	Диапазон выходных мощностей, Вт	Типовой КПД транзисторов, %	Напряжение питания, В
Si LDMOS	Универсальные корпусные транзисторы	0 – 2	5 - 15	60	28
GaAs MESFET	Универсальные корпусные транзисторы	0 - 14	до 14,5	40	8-10
GaAs HiFET	Универсальные корпусные транзисторы	0 – 2,5	1 - 8	35	14 - 28
GaAs HFET	Транзисторы в виде кристаллов и в SMD-корпусах	до 10,5	до 10	50	8
GaAs pHEMT	Универсальные корпусные транзисторы, транзисторы в виде кристаллов и в SMD-корпусах, МИС в виде кристаллов и в различных корпусах	0 - 50	до 15	55	8-10
GaInP HBT	Универсальные корпусные транзисторы и МИС X-диапазона	до 10,5	до 10	40	9
SiC MESFET	Универсальные корпусные транзисторы, транзисторы в виде кристаллов	0 – 4	до 60	40	48
GaN HEMT	Универсальные корпусные транзисторы, транзисторы в виде кристаллов и в SMD-корпусах, МИС в виде кристаллов и в различных корпусах	0 - 20	до 100	60	28 - 50

В таблице не приводятся данные о выходных мощностях внутрисогласованных транзисторов, содержащих внутри корпуса цепи согласования на тот или иной конкретный участок диапазона частот и не пригодные для построения широкополосных усилителей мощности, а также приборов на фосфиде индия, которые пока трудно отнести к категории мощных. Рассмотрим возможности применения этих кандидатов в «кирпичики».

Кремниевые полевые транзисторы с боковой диффузией (Si LDMOS) прочно заняли нишу базовых элементов в широкополосных усилителях с частотами до 1000 МГц. Приборы по данной технологии выпускаются компаниями Freescale Semiconductor, Sirenza Microdevices, PolyFET, NXP и другими. Отличаются низкой ценой при массовом производстве, высоким КПД, высокой допустимой рабочей температурой кристалла (200°C). В то же время имеют низкие предельные рабочие частоты (до 3,5 ГГц) и существенно более высокие (на порядок и более), чем приборы других технологий, удельные емкости активной структуры, что создает серьезные трудности их широкополосного согласования.

Арсенидгаллиевые полевые транзисторы с однородным легированием (GaAs MESFET), бывшие в прошлом веке наиболее массовым строительным материалом широкополосных усилителей СВЧ диапазона, постепенно утратили свои позиции, вытесненные арсенидгаллиевыми псевдоморфными гетероструктурными полевыми транзисторами (GaAs pHEMT). Кристаллы дискретных MESFET-транзисторов в настоящее время выпускаются компаниями Sumitomo Electric (традиционные серии FLC, FLX, FLK фабрики Fujitsu), Excelics, остаются в производстве несколько серий корпусных транзисторов нижней части сантиметрового диапазона (например – популярные модели MGF0910A, MGF0911A компании Mitsubishi Electric), широкая номенклатура МИС мощных широкополосных усилителей, выпускавшихся ранее компанией M/A Com (серия МАAPGM-xxx), снята с производства в связи с ликвидацией самого производства. Отличаются высокой надежностью, высокой линейностью передаточной характеристики, но уступают pHEMT-транзисторам по частотному диапазону, КПД, усилению. Имеют рабочие температуры кристалла до 175°C и удельную выходную мощность 0,4-0,6 Вт/мм. Мощные транзисторы и МИС по этой технологии выпускаются и рядом российских производителей (ФГУП «НПП «Пульсар», ФГУП «НПП «Исток», ОАО «Октава»).

Отдельной веточкой некогда могучего дерева MESFET технологии является достаточно редкая технология высоковольтных (с рабочими напряжениями до 28 В) арсенидгаллиевых MESFET полевых транзисторов, здесь основным серийным производителем приборов является компания AMCOM Communications. В силу высоковольтности и малых емкостей активной структуры хорошо подходят для использования в широкополосных усилителях, но частотный диапазон ограничен значениями 2,5-3 ГГц.

GaAs pHEMT-транзисторы до середины текущего десятилетия были (и пока остаются) самым массовым строительным материалом в классе широкополосных приборов. Существенное снижение стоимости приборов, изготавливаемых по этой технологии с размерами затвора 0,1 - 0,25 мкм ставшее следствием промышленного освоения процессов обработки пластин диаметром до 150 мм [3] и достижения высокого процента выхода годных схем, распространило эти приборы практически во все сектора применения, от мобильных телефонов и базовых станций до радаров, систем РЭП и систем связи миллиметрового диапазона. Эта технология стала стандартной и предоставляется практически всеми фирмами, выполняющими услуги по контрактному производству (foundry) МИС СВЧ. Использование этой технологии позволило наладить серийный выпуск монолитных усилителей в диапазонах до 32 ГГц с мощностями до 4-7 Вт. Ведущими компаниями (TriQuint Semiconductor, Excelics, Agilent Technologies, Hittite Microwave, Sumitomo Electric, RFMD, Mimix Broadband, UMS, Transcom и рядом других) выпускаются сотни типов мощных транзисторов и МИС сантиметрового и миллиметрового диапазонов в виде кристаллов, являющихся сегодня основным «кирпичиком» для построения широкополосных усилителей мощности на частотах выше 2 ГГц. Имеют высокое усиление и КПД, высокие граничные частоты, пригодны для работы в классе АВ. Рабочая температура кристалла до 150 °С, удельная выходная мощность до 1 Вт/мм.

Индий-галлий-фосфорные гетеробиполярные транзисторы и МИС (GaInP HBT) отдельными «вкраплениями» дополняют картину промышленных технологий мощных приборов. В сантиметровом диапазоне компанией United Monolithic Semiconductors (UMS)

выпускаются два типа специализированных МИС 10-Ваттных усилителей диапазона 8,5-11 ГГц для радаров с активной фазированной решеткой (СНА7010 и СНА8100), остальное присутствие этой технологии концентрируется на универсальных трактовых усилителях (gain-blocks) диапазона 0-6 ГГц с мощностями менее Ватта.

Революционным направлением развития мощных компонентов СВЧ, родившимся в прошедшем десятилетии, и перешедшим в фазу промышленного производства в середине текущего, стало направление широкозонных полупроводниковых материалов (карбида кремния SiC и нитрида галлия GaN) и приборов на их основе [4-6]. Физические основы новых технологий и их особенности, уже достаточно широко освещенные в литературе вообще и в нашем журнале, в частности, мы повторять не будем. Остановимся на промышленных аспектах их применения.

Карбид-кремниевые полевые транзисторы с однородным легированием (SiC MES-FET) по частотному диапазону применения вклиниваются между Si LDMOS приборами и приборами на арсениде галлия и нитриде галлия. Их основные преимущества – рабочие температуры кристалла до 255 °С, высокое рабочее напряжение, очень малые удельные емкости активной структуры. Удельная выходная мощность 2-3 Вт/мм. Недостатки - не очень высокий КПД, низкие предельные частоты, обусловленные малой подвижностью электронов в канале и высокая цена. Выпускаются единственным производителем – компанией CREE Inc. (серия CRF24-xxx) в виде кристаллов и в универсальных малогабаритных фланцевых корпусах. Являются подходящим «кирпичиком» для создания широкополосных усилителей мощности с высокими техническими характеристиками в диапазонах до 2,5 ГГц с выходной мощностью до 100-150 и более Ватт, предназначенных для тяжелых условий эксплуатации. Частотная характеристика выходной мощности одного из разработанных в ЗАО «Микроволновые системы» экспериментальных усилителей с выходной мощностью более 100 Вт и КПД более 26% в диапазоне частот 0.8 – 1.6 ГГц [7], приведена на рисунке 1.

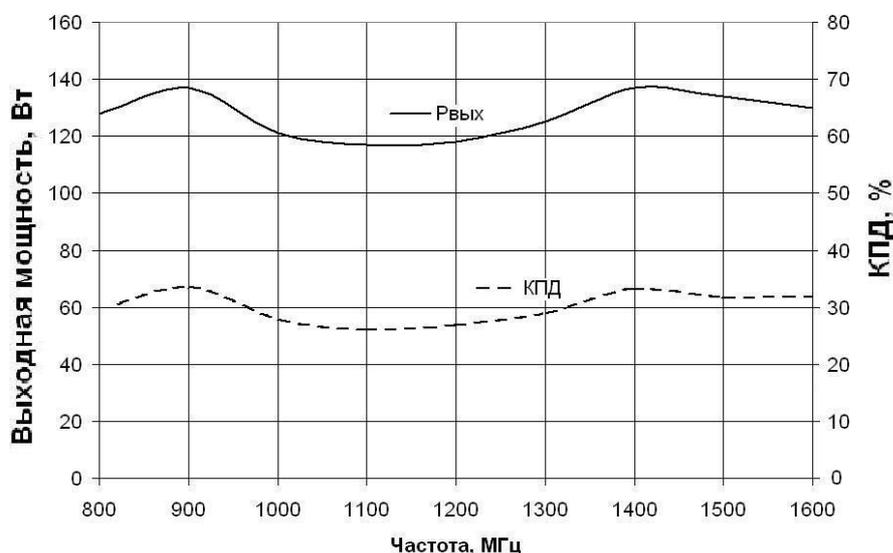


Рис.2. Частотные характеристики выходной мощности и КПД усилителя PM0816

Нитрид-галлиевые гетероструктурные полевые транзисторы (GaN HEMT) и МИС на их основе, освоенные к сегодняшнему дню в серийном производстве компаниями Cree Inc., TriQuint Semiconductor, Sumitomo Electric, Nitronex, RFMD открывают новую страницу в развитии параметров мощных широкополосных усилителей СВЧ диапазона. В этой технологии соединяются преимущества, важные для проектирования приборов - высокое напряжение питания (28 – 50 В); высокий КПД (более 60%); возможность работы в классе АВ с малой начальной рассеиваемой мощностью; частотный диапазон до 20 ГГц (в лабо-

раторных образцах с шириной затвора 0,1 мкм – до 150 ГГц); высокое усиление, малые емкости активной структуры, максимальная из существующих технологий удельная выходная мощность на единицу ширины затвора (более 5 Вт/мм²). К разряду недостатков серийных приборов, пожалуй, можно отнести «затянутую» динамическую характеристику (снижение коэффициента усиления транзистора начинается при выходной мощности существенно меньшей, чем максимальная) и несколько большую цену на единицу мощности, чем у хорошо освоенных GaAs приборов. В качестве иллюстрации полученных (и предельных для промышленных образцов) сочетаний параметров полоса частот-выходная мощность, на рисунках 2 и 3 приведены конструкции МИС усилителей мощности: SMPA0060025 фирмы Cree Inc. [8] и TGA2570 фирмы TriQuint Semiconductor [9]. Полученные уровни выходной мощности по меньшей мере на порядок превышают те, что демонстрирует в этих диапазонах частот GaAs-технология.

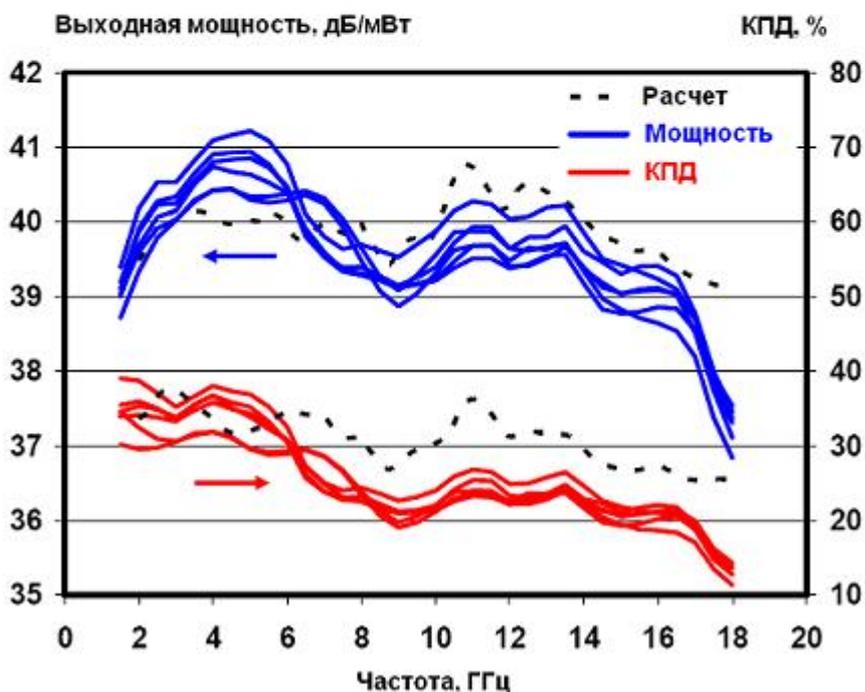
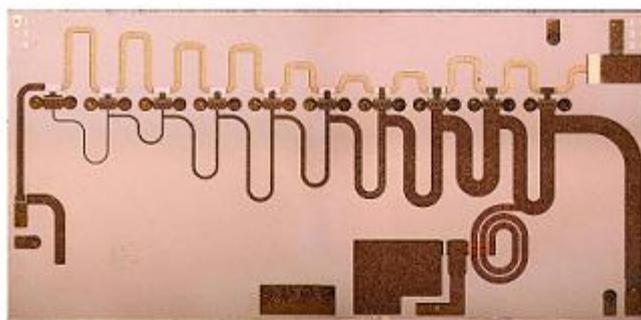


Рис.2 Конструкция и характеристики монолитного усилителя TGA2570

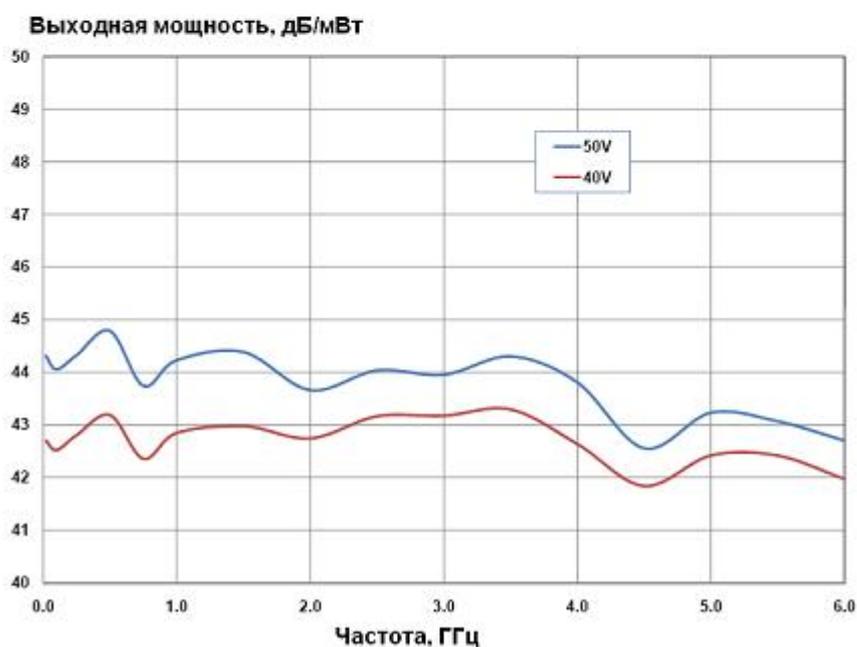
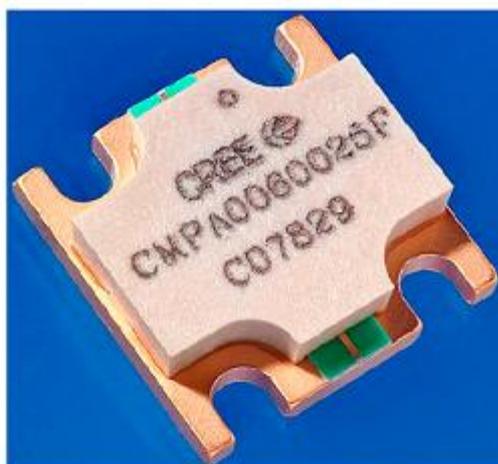


Рис.3 Конструкция и характеристики монолитного усилителя TGA2570

Параметры и габариты некоторых типов промышленно выпускаемых МИС, иллюстрирующие основные классы усилительных устройств и диапазоны частот применения, приведены в таблице 2.

Таблица 2 Параметры широкополосных монолитных усилителей на нитриде галлия.

Тип	Диапазон частот, ГГц	Выходная мощность, Вт	Коэффициент усиления, дБ	КПД, %	Конструкция
GaAs					
TGA2570 TriQuint Semiconductor	2-18	1	16	8	Кристалл
TGA2501 TriQuint Semiconductor	6 - 18	2,5	24	20	Кристалл
EMP216 Excelics Semiconductor	6 - 18	2	20	18	Кристалл
GaN					
СМРА2560025F Cree Inc.	2.5-6.0	25-37	23 - 27	> 30	Корпус 13 x 13 мм
СМРА0060002F Cree Inc.	0,02 – 6,0	4	17	25	Корпус 13 x 13 мм
СМРА0060025F Cree Inc.	0,02 – 6,0	25	16 - 21	> 30	Корпус МПЛ 13 x 13 мм
TGA2540-FL TriQuint Semiconductor	0,03-3	9	19	40	Корпус 17 x 12 мм
TGA2570 TriQuint Semiconductor	2-17	8-12	10 - 14	20	Кристалл
RF3826 RFMD	0,02-2,5	9	13	40	Корпус SMD 5x6 мм

Таким образом, на рынке «кирпичиков» для построения широкополосных (да и всех других) усилителей мощности сантиметрового диапазона складывается напряженная конкурентная ситуация между GaAs pHEMT и GaN HEMT технологиями, в которой техническими преимуществами владеет вторая, а производственными - пока первая.

Сходство и различия

Для оценки и сравнения возможностей применения GaN и GaAs транзисторов в схемах широкополосных усилителей мощности, а также возможностей «миграции» технических решений с одного материала на другой, проведем простой анализ их удельных (т.е., отнесенных к 1 мм ширины затвора транзистора) параметров. Воспользуемся известными [10] оценками для усилителя класса А максимальной выходной мощности P_{max} и оптимального (для достижения этой мощности) сопротивления нагрузки транзистора R_{opt} :

$$P_{max} = V_{ds} * I_{max} / 8; \quad (1)$$

$$R_{opt} = 2 * V_{ds} / I_{max}, \quad (2)$$

где V_{ds} – напряжение питания стока, I_{max} – максимальный ток канала открытого транзистора.

Из приведенных выражений несложно получить формулу для нового параметра - удельного оптимального сопротивления нагрузки (R_x):

$$R_x = V_{ds}^2 / (4 * P_x), \quad (3)$$

где P_x – удельная выходная мощность транзистора – параметр, которым широко оперируют в литературе. Типовые удельные параметры GaN и GaAs HEMT транзисторов, полученные из анализа линейных эквивалентных схем транзисторов, приведенных в литературе и справочных материалах фирм-изготовителей, а также указанный выше параметр R_x сведены в таблицу 3. Здесь же даны параметры двух конкретных типов транзисторов фирмы TriQuint Semiconductor, близких по конструкции, но различных по технологии.

Таблица 3 Сравнение типовых удельных параметров GaAs и GaN транзисторов

Параметры	GaAs pHEMT		GaN HEMT	
	типовые	TGF2021 (1 mm)	типовые	TGF2023 (1.25 mm)
Удельная емкость затвор-исток (C_{gsx}), pF/mm	1.8 - 3	2.74	1.1 - 2	1.2
Удельная крутизна переходной характеристики (G_{mx}), mS/mm	200-400	303	100-300	110
Удельная емкость сток-исток (C_{dsx}), pF/mm	0.15-0.3	0.199	0.2-0.4	0.2
Удельная выходная мощность (P_x), W/mm	0.7	1.0	5	5
Напряжение питания сток-исток (V_{ds}), V	9	10	28	32
Удельное оптимальное сопротивление нагрузки (R_x), Ohm*mm	29	26.6	39	54
Оптимальное (оценка) сопротивление нагрузки для выходной мощности 10 Вт (R_{10}), Ohm	2	--	19	--

Из анализа приведенных данных можно сделать следующие выводы:

- удельные емкость затвор-исток и крутизна GaN транзисторов (одновременно) в 1.5-2 раза ниже, чем у GaAs транзисторов, что является скорее преимуществом первых с точки зрения широкополосного согласования, так как требует меньших коэффициентов трансформации в согласующих цепях. Достижимое усиление в режиме малого сигнала можно считать достаточно близким;

- удельная емкость сток-исток, шунтирующая оптимальную нагрузку транзистора и затрудняющая построение выходной широкополосной согласующей цепи на частотах выше некоторой граничной частоты, у обоих классов транзисторов примерно одинакова.

- удельные оптимальные нагрузки транзистора (R_x) также оказываются близкими (несколько выше для GaN-транзисторов).

Приведенные соображения позволяют сделать обоснованные (и важные) предположение о том, что

а) свойства GaAs и GaN транзисторов с одинаковыми размерами затвора с точки зрения проектирования усилительных «кирпичиков» очень близки;

б) многие проекты и технические решения в части схем и конструкций согласующих цепей, разработанные для GaAs-транзисторов и МИС, могут быть с минимальными изменениями применены для GaN-транзисторов с равной, или на 20-50% большей шириной затвора, при этом в случае близкой длины затвора обоих типов активных структур, будут получены те же полосовые, усилительные и массогабаритные параметры, но при выходной мощности в несколько раз большей и с большим КПД.

Эксперименты и разработки, проведенные в ЗАО «Микроволновые системы», подтверждают это предположение.

Различия становятся видны при более детальном рассмотрении параметров «второго эшелона» (динамика уровней гармоник, фазовых и интермодуляционных искажений, способы отвода тепла, форма динамической характеристики и т.д). В качестве примера на рисунке 4 показаны динамические характеристики двух мощных усилителей диапазона 2-4 ГГц с выходной мощностью 20 Вт и усилением 43 дБ в линейном режиме – серийно выпускаемого ЗАО «Микроволновые системы» GaAs усилителя типа PM24-C8 (синие кривые) и разработанного в 2009 году экспериментального GaN - усилителя типа PM24-G2 (красные кривые).

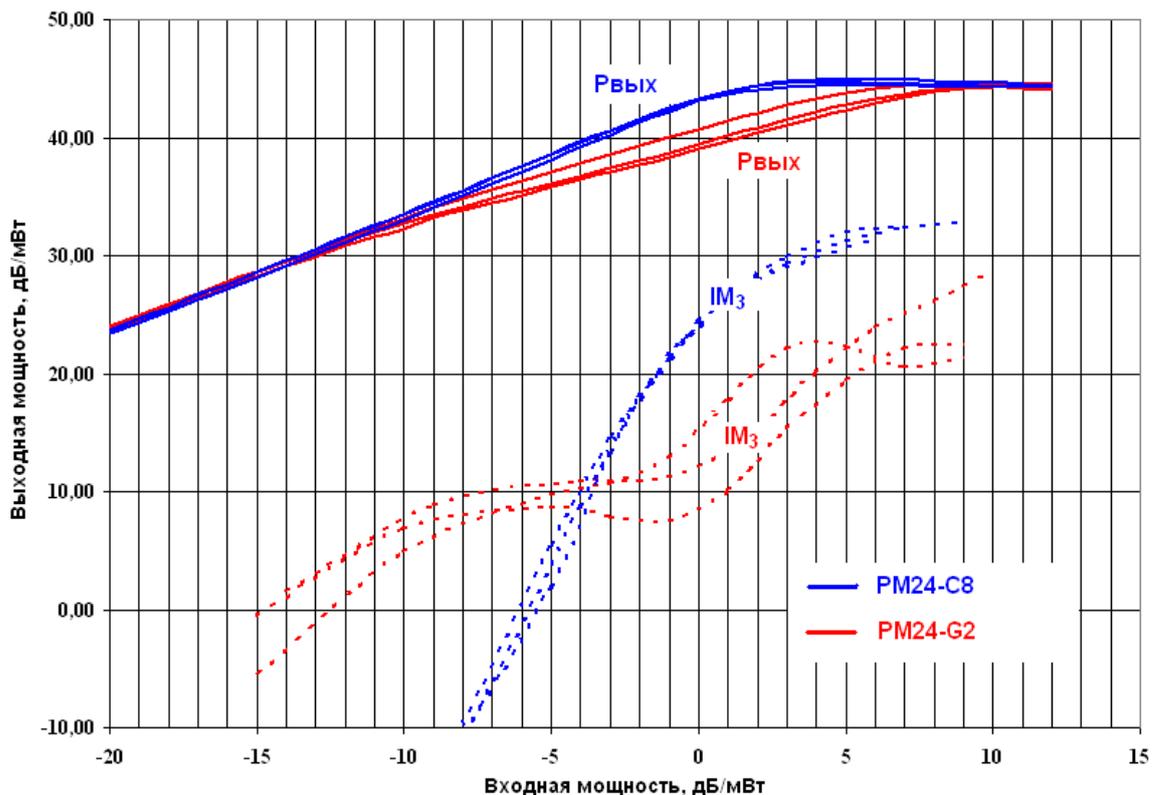


Рис.4 Сравнение динамических и интермодуляционных характеристик GaAs и GaN усилителей мощности диапазона 2-4 ГГц.

Усилитель на GaN транзисторах имеет более плавное «вхождение» в режим насыщения и на 5-10 дБ более низкий уровень интермодуляции третьего порядка (IM₃) при максимальной выходной мощности, однако, при выходной мощности в 2-3 раза меньшей, чем максимальная уже GaAs усилитель становится явным лидером с точки зрения ли-

нейности. Отличаются усилители и по характеру фазоамплитудных характеристик, и по тепловым режимам и по ряду других параметров. Так что отличия проявляются в системных тонкостях применения приборов, в целом же сходство преобладает.

Ещё (суммирование мощностей)

Сложность кристаллов МИС СВЧ диапазона, по-видимому, уже достигла предела, связанного с ограничением максимальной площади кристалла (25-30 мм²), при которой он (при толщине 50-100 мкм) становится очень сложным для монтажных манипуляций, и процент выхода годных при монтаже МИС резко падает. Физическая ширина кристалла транзистора или МИС (что определяется физической шириной транзистора выходного каскада) при этом составляет 4-6 мм. Максимальная мощность, снимаемая с кристалла (имеющего максимальную физическую ширину в своем классе приборов), таким образом, может быть оценена величинами, приведенными в таблице 4.

Таблица 4. Максимальная выходная мощность, снимаемая с кристалла МИС

Технология	Тип транзистора (МИС)	Физическая ширина кристалла, мм	Ширина затвора (выходного каскада), мм	Выходная мощность, Вт	Максимальная выходная мощность с кристалла, Вт (оценка)
GaAs MESFET	MAAPGM0079 M/A Com	8,15	--	20	20
GaAs HFET	TGF4260 TriQuint Semiconductor	2,4	9,6	5	
GaAs pHEMT	CHA7114 United Monolithic Semiconductor	3,31	--	8	
SiC MESFET	CRF24060D Cree Inc.	5,26	30	60	100
GaN HEMT	TGF2023-20 TriQuint Semiconductor	4,5	20	100	200

Если принять максимальной физической ширину кристалла, равную 8 мм, то максимальная выходная мощность, снимаемая с кристалла МИС, конструктивно ограничена величинами, приведенными в последней колонке таблицы 4. Оценка, конечно, достаточно грубая, плотность компоновки кристалла зависит и от сложности согласующих цепей, и от длины «пальца» встречно-штыревой структуры транзистора, оптимальной для конкретного диапазона частот, и от достигнутой удельной мощности, но представляется корректной.

Следующий шаг в наращивании выходной мощности транзисторных СВЧ усилителей - разработка эффективных многоканальных сумматоров мощности. Для построения мощных широкополосных усилителей применяются разнообразные конструкции сумматоров, начиная от традиционных ответвителей Ланге и тандемных мостов, и заканчивая многоканальными конструкциями на основе радиальных сумматоров [11] и «сверхразмерного коаксиального волновода» [12,13] с числом каналов 24-32 и эффективностью суммирования мощности 70-75%. Последний под торговой маркой *Spatium*TM успешно

применяется компанией CAP Wireless для построения усилителя типа СНРА0618-2 [13] с полосой 6-18 ГГц и выходной мощностью 45 Вт на базе GaAs монокристаллических «кирпичиков» с мощностью 2 Вт (рисунок 5).

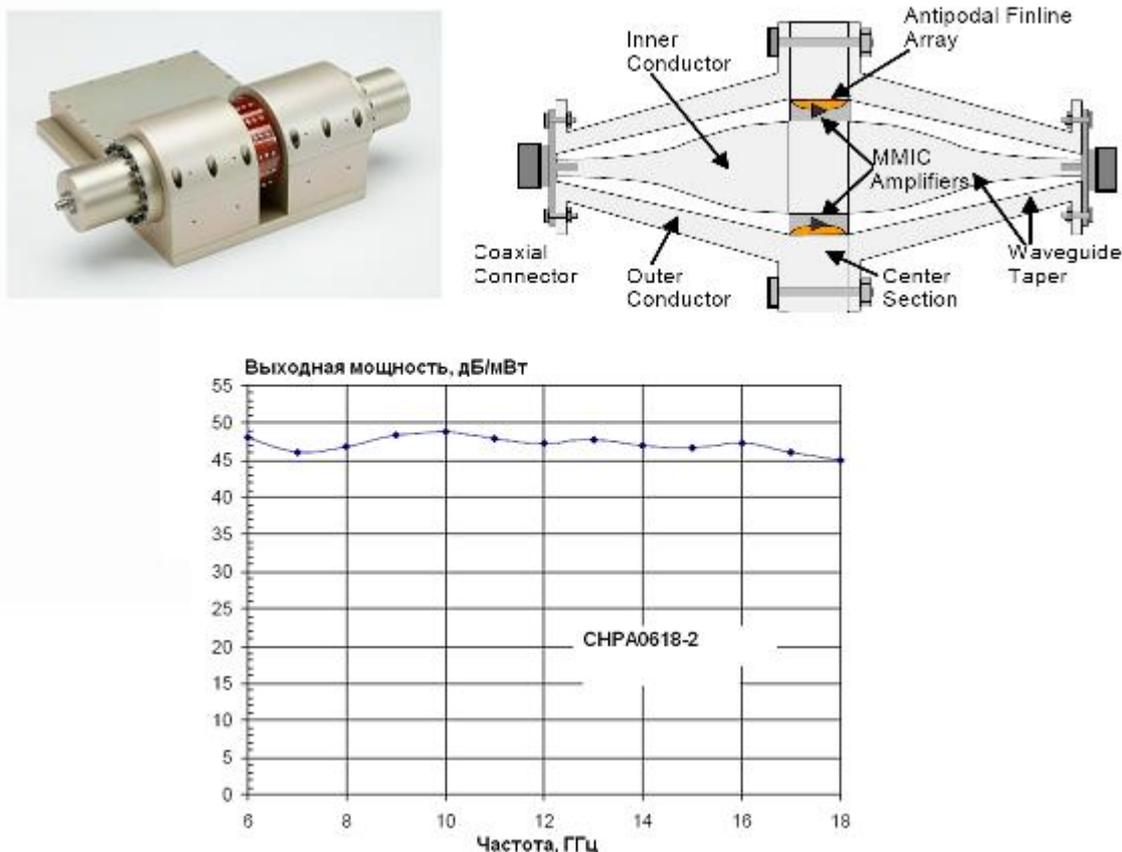


Рис.5. Конструкция и характеристики усилителя СНРА0618-2 на основе «сверхразмерного коаксиального волновода»

«Миграция» в конструкции такого типа с GaAs на GaN компоненты при решении задачи отвода соответствующего количества тепла от активных элементов должна вывести в ближайшее время широкополосные твердотельные приборы на уровень мощности, достигнутый широкополосными вакуумными усилителями на базе ламп бегущей волны непрерывного режима (100 – 400 Вт), что также будет являться знаковым моментом, который не мог быть достигнут ранее никакими схемными ухищрениями разработчиков твердотельных приборов.

Реальность сегодняшнего дня

Широкополосные усилители высокой мощности (от 10 Вт выходной мощности и выше) применяются в системах радиоэлектронного подавления, системах испытаний на электромагнитную совместимость, а также в некоторых новых радиолокационных системах, использующих широкополосные сигналы или сигналы с широкоим диапазоном перестройки частоты. Производством таких приборов за рубежом занимаются специализированные или частично-специализированные на усилительной тематике компании, в числе которых Aethercomm, AML Communications, Amplifier Research, CAP Wireless, Cernex, CTT, EMPower RF Systems, Keragis, MilMega, Ophir RF, QuinStar Technology, RFCore, Stealth Microwave и некоторые другие. В России единственной компанией, специализирующейся на разработке и производстве таких приборов является ЗАО «Микроволновые

системы» (г. Москва), несколько типов мощных широкополосных усилителей выпускают ФГУП «НПП «Исток» (г. Фрязино) и ОАО «Октава (г. Новосибирск).

Параметры некоторых наиболее мощных промышленных образцов широкополосных усилителей приведены на диаграмме рисунка 6.

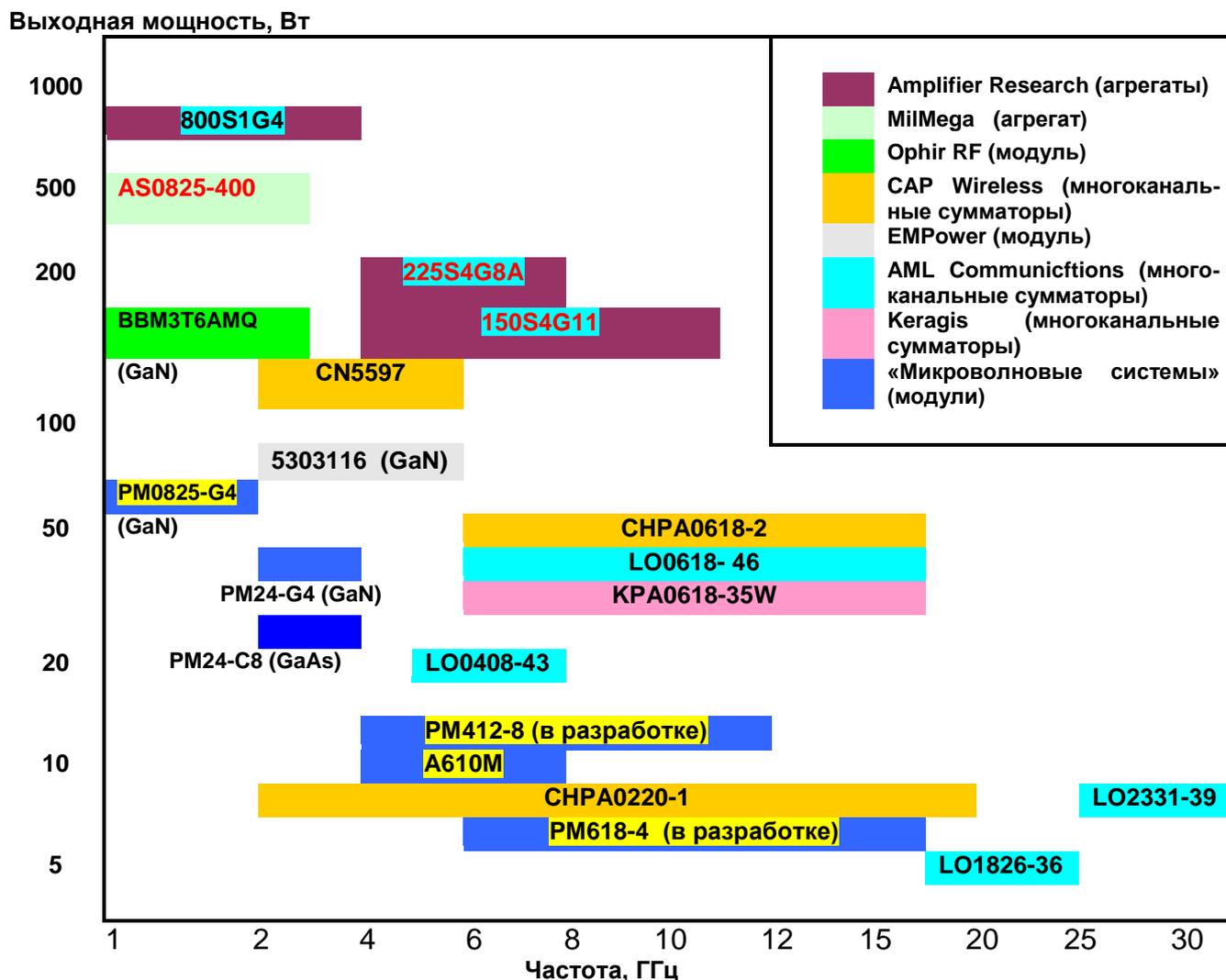


Рис.6. Уровень выходной мощности непрерывного режима современных широкополосных транзисторных усилителей

На диаграмме приведены данные усилителей, имеющих различный конструктивный облик. Это и традиционные СВЧ модули компактных габаритов, и описанные выше экзотические конструкции на основе объемных многоканальных сумматоров, и агрегаты, собранные в стационарные блоки с питанием от промышленной сети путем суммирования мощностей большого числа модулей.

Вместе с развитием технологий GaAs МИС за десятилетие выходная мощность сверхширокополосных усилителей диапазона 6-18 ГГц выросла в 10-20 раз при одновременном росте КПД с 3-5% до 10-15%. Освоение технологии GaN МИС в ближайшие годы позволит в этом популярном диапазоне сделать еще один скачок в уровне мощности в 3-4 раза и поднимет КПД приборов до 25% и более. В диапазоне от 1 до 4 ГГц использование GaN транзисторов дает уже сегодня существенное сокращение габаритов и массы усилительных модулей, например, уже упоминавшийся ранее экспериментальный GaN-усилитель PM24-G2 разработки ЗАО «Микроволновые системы» имеет по отношению к своему GaAs «собрату» PM24-C8 в 2 раза меньшие габариты и массу (см. рисунок

7), на 40% меньшую себестоимость (несмотря на относительно высокие цены на сами GaN транзисторы) и на 30-40% меньшую мощность потребления от источника питания. При этом остальные параметры обоих приборов очень близки (за исключением «затянутой» динамики).



Рис.7. Сравнение габаритов усилителей PM24-C8 (GaAs) и PM24-G2 (GaN)

С появлением на рынке корпусных GaN транзисторов многие фирмы-производители мощных усилителей (Aethercomm, EMPower RF Systems, Ophir RF) вывели на рынок широкий спектр моделей в диапазонах 0,8-2,5 ГГц, 1-3 ГГц, 0,5-2,5 ГГц с выходными мощностями 50-100 Вт и габаритами, сравнимыми с более старыми GaAs приборами, имевшими в этих диапазонах мощности 20-25 Вт. Усилители в диапазоне выше 3 ГГц появились на рынке немедленно после освоения фирмой Cree Ind. МИС 25-Ваттного усилителя в диапазоне частот 2,5-6 ГГц (см. таблицу 2). «В ближайшие часы» вслед за освоением МИС TGA2570 и транзисторов TGF2023 должны быть разработаны и вскоре появятся мощные широкополосные усилители верхней части сантиметрового диапазона. Высокие темпы развития этого направления могут быть проиллюстрированы [14] диаграммой рисунка 8, на которой показана динамика развития GaN МИС, предназначенных для использования в качестве выходного усилителя в приеме-передающих модулях АФАР диапазона 8-12 ГГц [15 – 21].

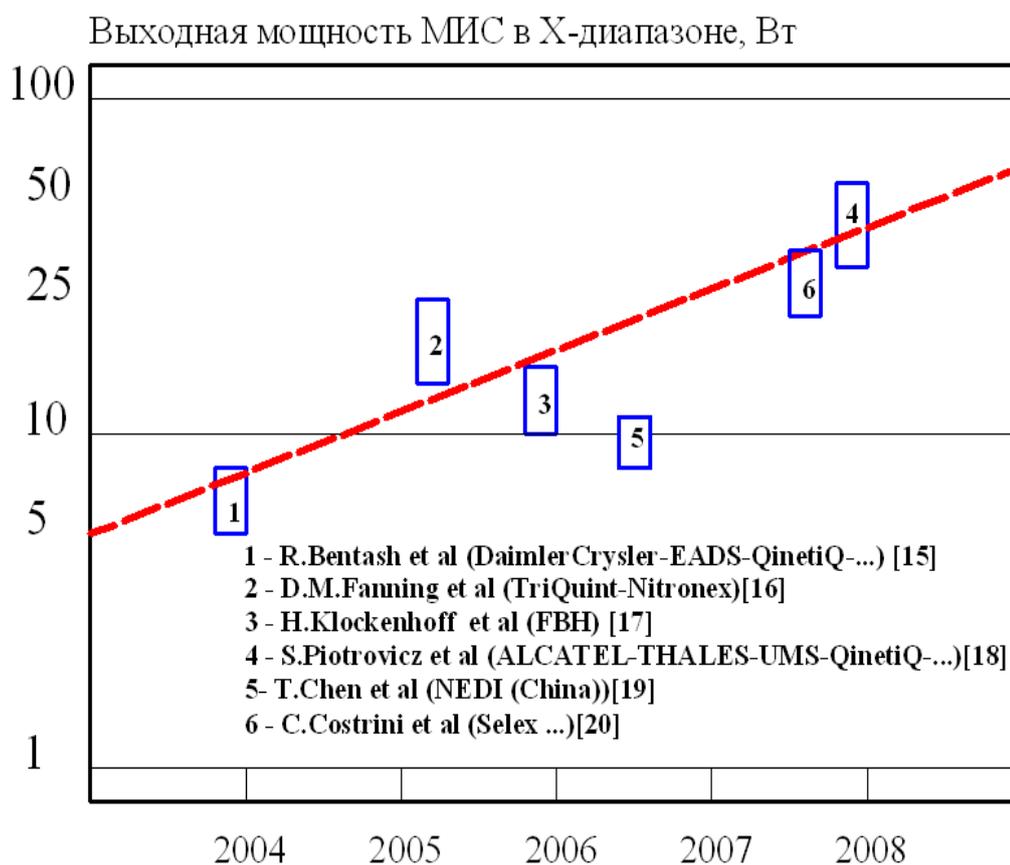


Рис.8 Динамика роста выходной мощности GaN МИС усилителей диапазона 8-12 ГГц

За 5 лет интенсивных разработок мощность, снимаемая с кристалла МИС в этом диапазоне выросла в 10 раз, при этом выходная мощность GaAs МИС аналогичного назначения, серийно выпускаемых фирмами TriQuint Semiconductor, UMS, RFMD, Mimix Broadband, остается эти годы на достигнутом достаточно давно уровне 6 -11 Вт.

Что дальше?

Наблюдение (и посильное участие) в процессе смены поколений мощных транзисторов и МИС СВЧ диапазона дает основание ожидать в предстоящем десятилетии следующих изменений на рынке разработок и производства широкополосных усилителей мощности.

Начнется активное вытеснение транзисторными усилителями широкополосных ЛБВ из класса приборов с выходной мощностью 10-100 Вт. Появятся разработки компактных твердотельных усилителей в популярных частотных диапазонах 1-4 ГГц, 2-6 ГГц, 4-12 ГГц, 6-18 ГГц, 2-20 ГГц с выходной мощностью до 100 Вт и КПД, габаритными размерами, надежностью и ценой, составляющими в совокупности серьезную конкуренцию ЛБВ в большинстве радиотехнических систем.

Параметры надежности GaN транзисторов и МИС будут доведены за счет совершенствования технологии и материалов до уровня, характерного для традиционных GaAs-технологий, появятся приборы, аттестованные для использования в условиях повышенной радиации, что расширит и закрепит GaN технологию на рынке военных и космических систем.

GaN МИС заменят своих GaAs собратьев в приемопередающих модулях АФАР трехсантиметрового и двухсантиметрового диапазонов, подняв выходную мощность по-

следних до 50-100 Вт и КПД до 45-50%, чего давно и пока безуспешно добивались разработчики радарных систем от традиционных технологий.

Будет создаваться «проектная инфраструктура», необходимая для эффективного проектирования GaN и дальнейшего расширения применения устройств – у производителей появятся нелинейные модели выпускаемых транзисторов, расширится количество фабрик и технологий изготовления заказных микросхем (foundry), расширится число производителей приборов, будут постепенно снижаться экспортные ограничения на поставки компонентов.

Будут реализованы в конкретных транзисторах и МИС, разработанных, необходимым образом испытанных и освоенных в производстве, наработки российских организаций промышленности и науки (среди них – ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН, ОАО «Светлана-Рост», ФГУП «НПП «Пульсар», ФГУП «НПП «Исток», ЗАО «Элма-Малахит», ИСВЧПЭ РАН, ФГУП «Гиредмет», ИФП РАН и ряд других организаций [23]), проводящих при поддержке государства исследования в области материалов и технологий мощных GaN приборов.



Смена технологических поколений мощных СВЧ транзисторов сантиметрового диапазона, обеспечивающая качественный скачок в параметрах мощных усилительных устройств, началась и проходит ускоренными темпами. Кто не успел – тот опоздал. На очереди алмазный транзистор [22]? Ждем...

ЛИТЕРАТУРА

- [1] **И.Шахнович.** Твердотельные СВЧ-приборы и технологии. Состояние и перспективы. – ЭЛЕКТРОНИКА – НТБ, 2005, №5, стр. 58-64.
- [2] **В.Майская.** Высокочастотные полупроводниковые приборы. Не кремнием и арсенидом галлия единым. – ЭЛЕКТРОНИКА – НТБ, 2004, №8, стр. 16-21.
- [3] **M.F.O'Keefe et al.** GaAs pHEMT-based technology for microwave application in a volume MMIC production environment on 150-mm wafers. - IEEE Trans. on SM, v.16, 2003, №3, p.p.376-383.
- [4] **W.L.Pribble et al.** Application of SiC MESFETs and GaN HEMTs in power amplifier Design. - IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Digest, 2002, p.p.1819-1822
- [5] **А.Васильев и др.** Новое поколение полупроводниковых материалов и приборов. Через GaN к алмазу. – ЭЛЕКТРОНИКА - НТБ, №4, 2007, с. 68-76.
- [6] **И.Викулов, Н.Кичаева.** GaN – технология - новый этап развития СВЧ-микросхем. - ЭЛЕКТРОНИКА - НТБ, 2007, №4, с. 80-85.
- [7] **В. Баранов и др.** Широкополосные усилители мощности дециметрового диапазона на SiC-транзисторах. - Материалы 16-ой Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”, Севастополь, Вебер, 2009, стр. 55 - 56.
- [8] <http://www.cree.com/products/pdf/CMPA0060025F.pdf>
- [9] **C. Campbell et al.** A Wideband Power Amplifier MMIC Utilizing GaN on SiC HEMT Technology. – IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008, v.43, № 10, p.2640 – 2643.
- [10] **S.C.Cripps.** RF Power Amplifiers for Wireless Communications. - Boston-London, Artech House, 1999.
- [11] **F. Sechi et al.** Radially-Combined 30-W, 14-16 GHz Amplifier. - IEEE MTT-S Sympos-

sium Digest, 1994, pp. 1737-1740.

- [12] **P.Jia et al.** Multioctave spatial power combining in oversized coaxial waveguide. - IEEE Transaction on MTT, v.50, 2002, №5, p.p.1355-1360.
- [13] http://www.capwireless.com/pdf/pdf_pa/spatium/Spatium_Tech_Pres.pdf
- [14] **А.Кищинский.** Твердотельные СВЧ усилители мощности на нитриде галлия – состояние и перспективы развития. - Материалы 16-ой Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”, Севастополь, Вебер, 2009, стр. 11 - 16.
- [15] **R. Behtash et al.** Coplanar AlGaIn/GaN HEMT power amplifier MMIC at X-band. - 2007 IEEE MTT Symposium Digest, p.p. 1657-1659
- [16] **D. M. Fanning et al.** 25 W X-band GaN on Si MMIC. - GaAs Mantech Conference Proceedings, 2005
- [17] **H. Klockenhoff et al.** A Compact 16 Watt X-Band GaN-MMIC Power Amplifier. - IEEE MTT-S Digest, 2006, p.p.1846-1849
- [18] **S. Piotrowicz et al.** State of the Art 58W, 38% PAE X-Band AlGaIn/GaN HEMTs microstrip MMIC Amplifiers. - IEEE Compound Semiconductor IC Symposium, 2008
- [19] **T.Chen et al.** X-Band 11W AlGaIn/GaN HEMT Power MMICs. - EwMIC Conference Proceedings, 2007, p.p. 162-164
- [20] **C.Costrini et al.** A 20 Watt Micro-strip X-Band AlGaIn/GaN HPA MMIC for Advanced Radar Applications. - EwMIC Conference Proceedings, 2008, p.p. 1433-1436
- [21] **И. Викулов.** GaN-микросхемы приемопередающих модулей АФАР: Европейские разработки. - ЭЛЕКТРОНИКА – НТБ, 2009, №7, стр. 90 - 97.
- [22] **А. Васильев и др.** Новое поколение полупроводниковых материалов и приборов. Через GaN к алмазу. - ЭЛЕКТРОНИКА – НТБ, 2007, №4, стр. 68 - 76.
- [23] **НИТРИДЫ ГАЛЛИЯ, ИНДИЯ И АЛЮМИНИЯ – СТРУКТУРЫ И ПРИБОРЫ.** - Тезисы докладов 6-й Всероссийской конференции, 18–20 июня 2008 года, Санкт-Петербург