

МИКРОВОЛНОВЫЕ ТРАНЗИСТОРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ - СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Кищинский А.А.

Опубликовано в материалах 14-й Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Вебер, 2004 г., стр.7-11
Тел.: +7(495) 263-96-29; e-mail: amplifiers@mail.ru



Аннотация – Рассмотрен мировой технический уровень и тенденции развития направления транзисторных усилителей мощности СВЧ и миллиметрового диапазона, транзисторов и монолитных интегральных схем повышенной мощности.

I. Введение

В совершенствовании конструкций СВЧ усилителей мощности на основе транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС), а также в развитие необходимых для этого полупроводниковых технологий в течение последнего десятилетия вкладывались значительные средства и интеллектуальные силы ведущих мировых электронных компаний и университетов. Целью настоящей работы является анализ достигнутых технических параметров транзисторных усилителей высокого уровня мощности (10-100 Вт и более) и основных тенденций развития этого класса СВЧ устройств.

II. Основная часть

Двигателем развития полупроводниковых технологий мощных СВЧ транзисторов является рост рынка дискретных приборов и МИС. Этот рынок обусловлен ростом разнообразия и количества развертываемых систем (в первую очередь – систем связи). В свою очередь, совершенствование параметров и снижение себестоимости транзисторов и МИС существенно расширяет возможности их применения в аппаратуре, возможности создания и продвижения на рынок новых систем. Этот круг замкнут и в течение последнего десятилетия эффективно работал на развитие технологий, предоставляя в распоряжение разработчиков новые возможности, иногда принципиально изменяющие подход к проектированию. К системным применениям, наиболее активно стимулировавшим развитие СВЧ полупроводниковых технологий, и бурно развивавшимся за счет них в последние годы, можно отнести системы широкополосной связи миллиметрового диапазона (LMDS и аналогичные), системы «третьего поколения» (3G) широкополосной сотовой связи, системы спутниковой связи (в первую очередь – VSAT), радиолокационные системы на основе активных фазированных антенных решеток (АФАР).

Современные полупроводниковые технологии, используемые при производстве мощных дискретных и монолитных компонентов, приведены в таблице 1. Темным цветом выделены частотные диапазоны эффективного применения промышленных технологий, как успешно использующихся многие десятилетия (Si RF BJT, MESFET), так и освоенных в производстве уже в новом столетии (0.1 μm InP HEMT). Светлым выделены новые перспективные технологии, их переход в статус промышленных ожидается в ближайшие годы.

Таблица 1.

| Технология | Частотный диапазон эффективного применения |
|-------------------------------------|--|
| - Si RF BJT | 1 - 2 |
| - Si RF MOSFET | 1 - 2 |
| - SiC MESFET | 1 - 2 |
| - 1 μm HBT | 1 - 2 |
| - 0.5 μm GaN on SiC HEMT | 1 - 2 |
| - 0.5 μm MESFET | 1 - 2 |
| - 0.25 μm HFET | 1 - 2 |
| - 0.25 μm GaAs pHEMT | 1 - 2 |
| - 0.15 μm GaAs pHEMT | 1 - 2 |
| - 0.15 μm InP HEMT | 1 - 2 |
| - 0.1 μm GaAs pHEMT | 1 - 2 |
| - 0.1 μm InP HEMT | 1 - 2 |

Частота, ГГц: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200

Кремниевые технологии дискретных мощных СВЧ транзисторов развиваются эволюционно, разделив области применения между биполярными (импульсные радиолокаторы) и MOSFET-транзисторами (системы сотовой связи). Высокие достигнутые параметры MOSFET-транзисторов (высокая линейность при усилении многочастотных сигналов при высоком КПД и мощностях до 150 Вт в диапазоне 2.1 ГГц) практически вытеснили биполярную технологию из наиболее массовых применений в базовых станциях сотовой связи.

В развитии базовых для микроволнового диапазона A_3B_5 -полупроводниковых технологий можно выделить следующие основные тенденции:

- постепенный уход с арены классической технологии полевых транзисторов с однородным легированием канала (MESFET). Эта технология остается в производстве традиционных и хорошо освоенных высокоомощных внутрисогласованных и отдельных типов универсальных дискретных транзисторов сантиметрового диапазона и серии МИС усилителей сантиметрового диапазона компании M/A Com [1].

- существенное снижение стоимости приборов, изготавливаемых по технологии превдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов (pHEMT) с размерами затвора 0.25 мкм, за счет промышленного освоения процессов обработки пластин диаметром до 150 мм [2] и обеспечение высокого (более 50%) процента выхода годных схем. 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 Вт [3].

- освоение в производстве технологий МИС СВЧ на фосфиде индия с размерами затвора 0.1 мкм, что дает возможность продвижения транзисторных МИС усилителей мощности в диапазон 90-200 ГГц [4].

Обозначенные выше процессы эволюционны и обусловлены потребностями массового производства недорогих МИС миллиметрового диапазона. Революционным же направлением развития мощных компонентов СВЧ, родившимся в прошедшем десятилетии, стало направление широкозонных полупроводниковых материалов (карбида кремния SiC и нитрида галлия GaN) и приборов на их основе [5,6]. Это направление, активно поддерживаемое военными, в ближайшем будущем должно позволить в несколько раз повысить выходную мощность транзисторов и МИС сантиметрового диапазона. Не останавливаясь подробно на деталях отметим, что за счет существенно большей теплопроводности как эпитаксиальных пленок, так и подложки-носителя, а также за счет втрое большей ширины запрещенной зоны в транзисторах на основе нитрида галлия реализованы удельные мощности транзисторной структуры 4-8 Вт/мм и более, что на порядок превышает удельную мощность арсенидгаллиевых транзисторов. Для промышленного освоения GaN-транзисторов и МИС требуется еще решение ряда проблем, в числе которых:

- долговременная стабильность параметров и подтверждение надежности;
- эффекты «памяти» и низкочастотные нестабильности;
- относительно высокая цена;

Одним из принципиальных преимуществ GaN и SiC-транзисторов является высокое (20-50 В) напряжение питания стока, что при равных с GaAs транзисторами отдаваемых в нагрузку мощностях приводит к значительному (на порядок) увеличению оптимального импеданса нагрузки стока и значительному облегчению согласования транзистора с нагрузкой. Сказанное иллюстрируется данными таблицы 2, в которой приведены оценки оптимального импеданса нагрузки для трех типов транзисторов с выходной мощностью 10 Вт на частоте 2 ГГц.

Таблица 2.

| Технология | Тип транзистора | Паспортная выходная мощность | Напряжение питания стока | Ток питания стока в режиме класса «А»; | Оптимальное сопротивление нагрузки [7]. |
|------------|------------------------|------------------------------|--------------------------|--|---|
| | | | | | |
| GaAs | Mitsubishi MGF0911A | 12.0 | 10 | 2.6 | 3.8 |
| SiC | Cree CRF-24010 | 10.0 | 48 | 0.75 | 64 |
| GaN | Lossy et al [8] (2 mm) | 10.4 | 26 | 1.1 | 23.6 |

Сравнительные данные о выходной мощности наиболее мощных серийных транзисторов СВЧ диапазона приведены на диаграмме рисунка 1. Область применения мощных внутрисогласованных транзисторов заканчивается на частотах 15-17 ГГц, дискретных широкополосных транзисторов – на частотах 25 ГГц, далее усилители строятся на основе кристаллов и корпусированных МИС.

Монолитные усилители за прошедшее десятилетие совершенствовались быстрыми темпами. Выходная мощность, снимаемая с кристалла МИС выросла более, чем в 10 раз, при

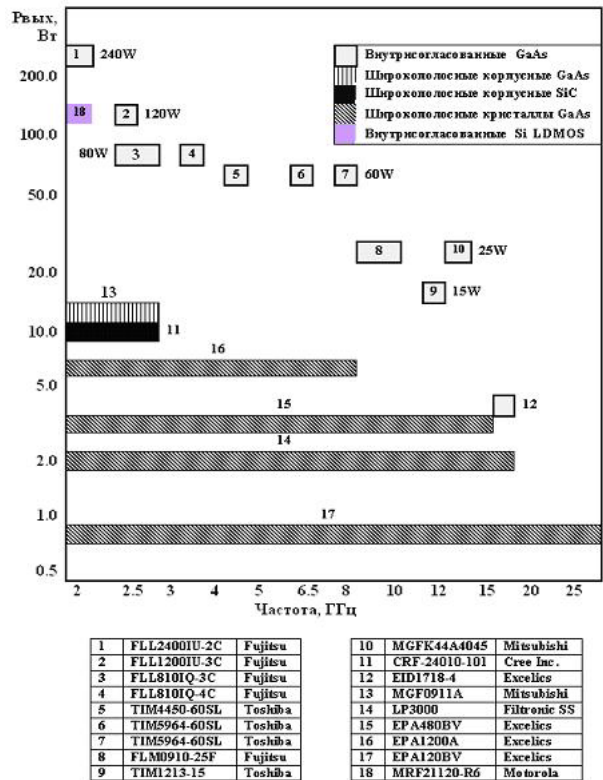


Рис.1. Параметры дискретных СВЧ транзисторов
Fig.1 Discrete microwave transistors parameters

этом цена изделий уменьшилась в 3-8 и более раз. Двигателями развития выступают системы коммерческой связи миллиметрового диапазона и военные системы на основе АФАР. Важнейшей задачей и тех и других является снижение цены аппаратуры. Основные параметры (полоса-мощность), полученные в лабораторных и промышленных образцах МИС СВЧ, приведены на диаграмме рисунка 2.

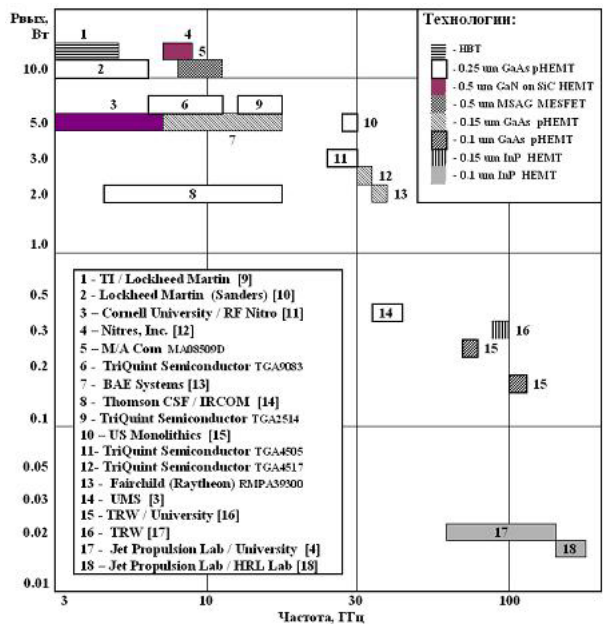
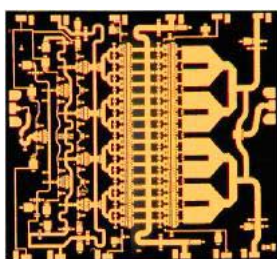


Рис.2. Параметры МИС усилителей СВЧ диапазона
Fig.2 Microwave MMIC amplifiers parameters

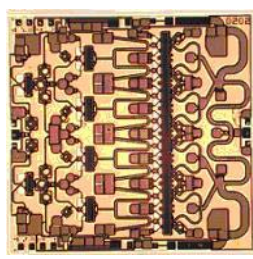
В сантиметровом диапазоне выходная мощность GaAs МИС, по-видимому, уже достигла предела (10-20 Вт), связанного с ограничением максимальной площади кристалла (25-30 мм²), при которой он (при толщине 50-75 мкм) становится предельно хрупким, и процент выхода годных при монтаже МИС резко падает. Площади кристаллов МИС миллиметрового диапазона составляют 12-16 мм², что оставляет еще некоторый простор для наращивания мощности до 5-10 Вт. Дальнейшее наращивание энергетики связано напрямую с успехами в отработке новых широкозонных материалов (GaN в первую очередь) и совершенствованием технологии гетеробиполярных транзисторов (HBT) на основе материалов группы А₃В₅, обеспечивающих значительно большие плотности мощности и меньшие размеры кристаллов МИС. По сообщению компании Cree, Inc., уже разработана технология GaN транзисторов с плотностью мощности 30 Вт/мм на частоте 8 ГГц [19].

Конструкции современных мощных МИС усилителей (рисунок 3) отличаются следующим характерными особенностями:

- полная симметрия схемы;
- очень высокая плотность компоновки;
- использование максимально простых входных и межкаскадных согласующих цепей на сосредоточенных элементах;
- разбиение выходной транзисторной структуры на большое (4,8,16) число отдельных структур с реализацией т.н. «корпоративных» согласующих цепей (объединение индивидуальных согласующих цепей субтранзисторов в общую синфазно-связанную распределенную цепь);
- относительно широкие, с применением распределенных элементов, выходные согласующие цепи;
- использование толстых (до 12 мкм) гальванических линий.



а) МИС усилителя
5Вт / 30 ГГц [15]



а) МИС усилителя
10Вт / 10 ГГц [1]

Рис.3. Конструкции МИС усилителей
Fig.3 Microwave MMIC amplifiers layouts

Бурное развитие цифровых систем связи со сложными методами модуляции потребовало разработки новых подходов к проектированию мощных усилителей для таких систем, введения и оптимизации новых параметров многочастотного режима, разработки разнообразных методов линеаризации усилителей и повышения КПД активных приборов. Эти направления развития схемотехники усилителей мощности, хорошо освещенные в работе [20], здесь не рассматриваются, тем более, что в промышленных

конструкциях усилителей высокой мощности они пока находят весьма ограниченное применение (за исключением передатчиков базовых станций сотовой связи). Здесь хочется отметить только практическую реализацию усилительного каскада L-диапазона класса F [21] с добавленным КПД более 65% при выходной мощности 10Вт с линейной передаточной характеристикой, выполненного на базе HBT-транзистора.

Одним из важных направлений исследований, непосредственно определяющих возможности наращивания выходной мощности транзисторных СВЧ усилителей является разработка эффективных многоканальных сумматоров мощности. Здесь необходимо отметить прекрасные работы группы авторов из Калифорнийского университета [22,23]. Разработаны широкополосные пространственные сумматоры мощности на основе прямоугольного волновода [22] и «сверхразмерного коаксиального волновода» [23] (рисунок 4) с полосами 40-100%, числом каналов 24-32 и потерями на деление-суммирование 1.3-2.4 дБ и эффективностью суммирования мощности 70-75%. Конструкции сумматоров предусматривают непосредственную интеграцию МИС усилителей.

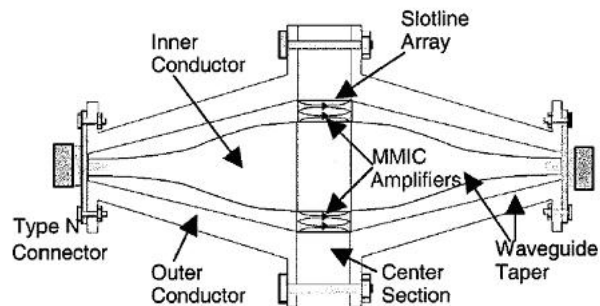


Рис.4. 32-канальный сумматор X-Ku диапазона [23]
Fig.4 X-Ku-band 32-channel combiner [23]

На образцах усилителей, собранных авторами на основе указанных типов сумматоров и коммерческих МИС фирмы TriQuint Semiconductor, получены уровни мощности 60-129 Вт в диапазоне 8-11 ГГц, и 20-50 Вт в диапазоне 6-17 ГГц. Существенные результаты также получены в области квазиоптических и пространственных сумматоров миллиметрового диапазона, они более подробно рассмотрены в работе [24].

Наиболее мощные транзисторные усилители традиционно разрабатываются для передатчиков радиолокационной аппаратуры (не АФАР) S- и X-диапазонов импульсного режима. Это уникальные изделия на основе многоканальных (как правило – волноводных) суммирующих схем с импульсной выходной мощностью до 10-30 кВт [25]. Разработана конструкция транзисторного передатчика подсвета цели в X-диапазоне [26], имеющего выходную мощность в непрерывном режиме 2 кВт при компрессии усиления 1 дБ. Передатчик построен на основе коммерческих внутрисогласованных транзисторов с мощностью 15 Вт. Использована трехступенчатая (13 – 4 – 4) волноводная схема суммирования мощности 208 усилительных модулей с общие эффективностью суммирования около 70%. Электронный КПД передатчика составил 15%.

Для наземных и бортовых передатчиков систем космической связи разработаны усилители мощности с пиковой мощностью в сотни Ватт в сантиметровом и десятки Ватт в миллиметровом диапазонах. Параметры некоторых наиболее мощных промышленных образцов таких усилителей приведены на диаграмме рисунка 5.

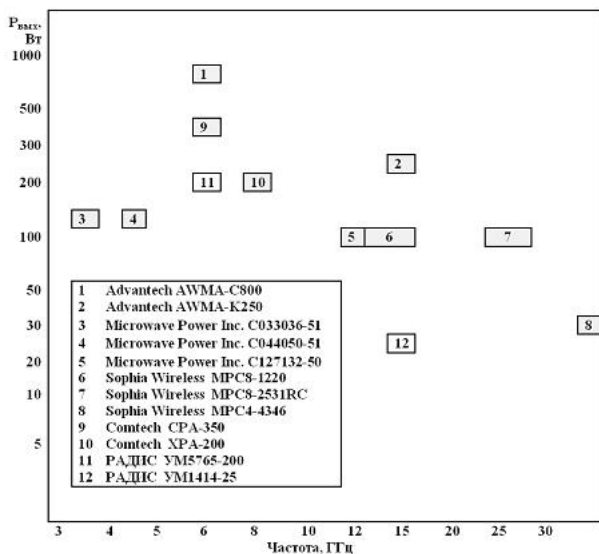


Рис.5. Параметры усилителей для систем связи
Fig.5 Communication amplifiers parameters

Для систем повышенной надежности разрабатываются резервированные системы, общий вид двухканального резервированного усилителя УМ5765-100Р фирмы РАДИС [27] с мощностью 100 Вт в С-диапазоне показан на рис. 6.

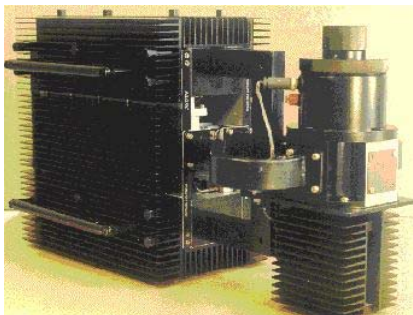


Рис.6. Резервированный усилитель С-диапазона
Fig.6 C-band redundant amplifier system

Широкополосные усилители высокой мощности 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. Строятся такие усилители на основе кристаллов дискретных широкополосных транзисторов (до С-диапазона) и на основе МИС (начиная с Х-диапазона). Параметры некоторых наиболее мощных промышленных образцов таких усилителей приведены на диаграмме рисунка 7. Вместе с развитием технологий МИС за десятилетие выходная мощность сверхширокополосных усилителей С-Х-Ки-диапазонов выросла в 10-20 раз при одновременном росте КПД с 3-5% до 10-15%.

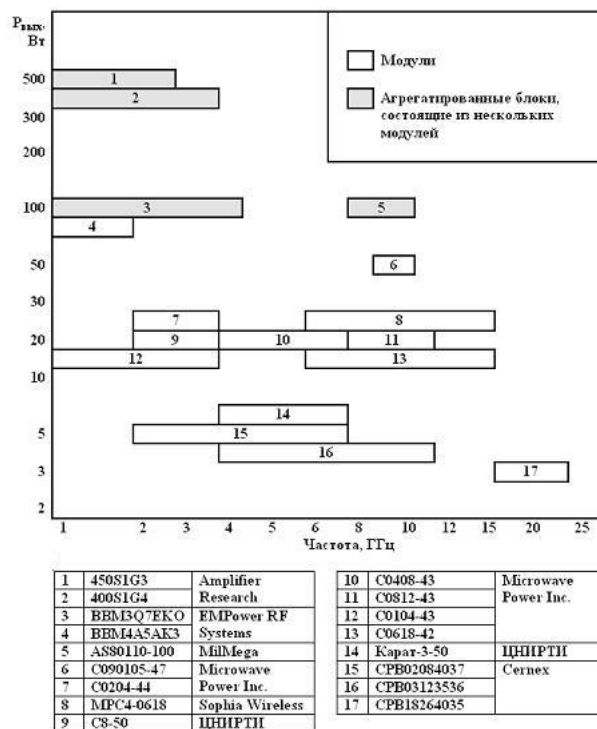


Рис.7. Параметры широкополосных усилителей
Fig.7 Wideband amplifiers parameters

При построении усилителей мощности для радиолокационных систем с АФАР основное внимание уделяется не столько выходной мощности элемента (она составляет сейчас в X-диапазоне от 3 до 15 Вт), сколько КПД, габаритам, возможности интеграции в антенное полотно, стоимости элемента. Эти очень интересные вопросы выходят за рамки данной работы и здесь не рассматриваются.

Ближайшие годы интерес к широкополосным усилителям мощности будет нарастать в связи с активными разработками новых принципов и систем связи и локации на основе сверхширокополосных сигналов.

III. Заключение

Таким образом, проведенный анализ десятилетнего периода развития технологий, компонентов и конструкций транзисторных усилителей большой мощности сантиметрового и миллиметрового диапазонов показал высокую и устойчивую динамику роста как главного показателя качества данного типа устройств – выходной мощности (10-кратное увеличение за 10 лет), так и разнообразия применений и рынка систем, особенно в миллиметровом диапазоне. Транзисторные усилители практически вытеснили электривакуумные СВЧ приборы из мощностного диапазона 1-10 Вт, заканчивается вытеснение вакуумных приборов из ниши 10-100 Вт в сантиметровом диапазоне (кроме сверхширокополосных) и начинается наступление на диапазон 100-1000Вт, темпы которого в ближайшие годы усилятся с прохождением барьера промышленного освоения приборов на широкозонных полупроводниках.

IV. Список литературы

- [1] Microwave and millimeter wave IC products for military and commercial radar//Microwave Journal, 2004, vol.47, №2, p.121
- [2] 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.
- [3] A.Bessemlouin et al. A miniaturized 0.5-watt Q-band 0.25-um GaAs PHEMT high power amplifier MMIC. 32 European Microwave Conf. Digest, 2002
- [4] L.Samoska et al. 65-145 GHz InP MMIC HEMT medium power amplifiers. IEEE MTT-S Int.Microwave Symp. Digest, 2001
- [5] В.Н.Данилин и др. Мощные высокотемпературные и радиационно-стойкие СВЧ приборы нового поколения на широкозонных гетеропереходных структурах AlGaIn/GaN. Обзоры по электронной технике, Сер.1. СВЧ техника, 2001, вып.1.
- [6] W.L.Pribble et al. Application of SiC MESFETs and GaN HEMTs in power amplifier Design, IEEE MTT-S Int.Microwave Symp. Digest, 2002, p.p.1819-1822
- [7] S.C.Cripps. RF Power Amplifiers for Wireless Communications//Boston-London, Artech House, 1999.
- [8] R.Lossy et al. Power RF-operation of AlGaIn/GaN HEMTs grown on insulating Silicon Carbide Substrates. 32 European Microwave Conf. Digest, 2002
- [9] M.R.DeHaan et al. A 15-watt dual band HBT MMIC power amplifier. IEEE MTT-S Int.Microwave Symp. Digest, 1997
- [10] J.J.Komiak et al. High efficiency 11 watt octave SiC-band PHEMT MMIC power amplifier. IEEE MTT-S Int.Microwave Symp. Digest, 1997
- [11] B.M.Green et al. High-power broad-band AlGaIn/GaN HEMT MMICs on SiC substrates. IEEE Trans. on MTT, v.49, 2001, №12, p.p.2486-2493
- [12] Y.-F.Wu et al. 14-W GaN-based Microwave power amplifiers. IEEE MTT-S Int.Microwave Symp. Digest, 2000
- [13] J.J.Komiak et al. High efficiency wideband 6 to 18 GHz PHEMT power amplifier MMIC. IEEE MTT-S Int.Microwave Symp. Digest, 2002, p.p. 905-907.
- [14] L.Roussel et al. Two octave PHEMT power amplifier for EW applications. 30 European Microwave Conf. Digest, 2000
- [15] C.Gron Dahl et al. Wideband 5.5W Ka-band Low-Cost MMIC high power amplifier with 30dB of gain. 32 European Microwave Conf. Digest, 2002.
- [16] H.Wang et al. Power-amplifier modules covering 70-113 GHz using MMICs. IEEE Trans. on MTT, v.49, 2001, №1, p.p.9-16
- [17] Y.C.Chen et al. A 95-GHz InP HEMT MMIC amplifier with 427-mW power output. IEEE mW and Guided Wave Lett., v.8, 1998, №11, p.p. 399-401
- [18] L.Samoska et al. MMIC HEMT power amplifier for 140 to 170 GHz. Technical Support Package, Computer/Electronic category, Nov-2003 issue, p.49, NPO-30127 (www.techbriefs.com/tsp)
- [19] Cree Achieves Major Advance in Gallium Nitride Transistor Power Density. <http://www.cree.com/News/nes183.asp>
- [20] F.H.Raab et al. Power amplifiers and transmitters for RF and microwave. IEEE Trans. on MTT, v.50, 2002, №3, p.p.814-826.
- [21] N.Le Gallou et al. 10W high efficiency 14V HBT power amplifier for space applications. 33 European Microwave Conf. Digest, 2003, p.p. 273-276
- [22] N.-S.Cheng et al. A 120-W X-band spatially combined solid-state amplifier. IEEE Trans. on MTT, v.47, 1999, №12, p.p.2557-2561.
- [23] P.Jia et al. Multioctave spatial power combining in oversized coaxial waveguide. IEEE Trans. on MTT, v.50, 2002, №5, p.p.1355-1360.
- [24] M.P.DeLisio, R.A.York. Quazi-optical and spatial power combining. IEEE Trans. on MTT, v.50, 2002, №3, p.p.929-936
- [25] M.Cicolani. High power modular S-band solid-state transmitters family for ATC and naval radar applications. IEEE MTT-S Int.Microwave Symp. Digest, 2000
- [26] H.Ashoka et al. An X-band 2kW CW GaAs FET power amplifier for continuous wave illuminator application. IEEE MTT-S Int.Microwave Symp. Digest, 2000
- [27] <http://www.radis.ru>

MICROWAVE SOLID-STATE POWER AMPLIFIERS – STATE-OF-THE-ART AND FUTURE TRENDS

A.Kistchinsky

phone: +7(095) 263-96-29

e-mail: amplifiers@mail.ru

Annotation – Considered are the world technical achievements and tendencies in the development of microwave and millimeter-wave transistor high power amplifiers, microwave transistors and MMICs.

I. Introduction

The purpose of the work is to analyze the most advanced technical parameters of high power microwave transistor amplifiers (10-100 Watt and greater) as well as the main tendencies in the development of this class of microwave devices.

II. The Main Part

The systems that have actively stimulated the development of microwave technologies include wideband millimeter-wave communication systems (LMDS and other similar systems), the wideband "third generation" (3G) mobile systems, the space communication systems (primarily VSAT), and modern radar systems based on active phased array antennas.

Modern semiconductor technologies used for producing power discrete transistors and MMICs are presented in Table 1.

One can distinguish the following tendencies in the development of traditional A_3B_5 technologies:

- gradual disappearance of MESFET technology;
- considerable decrease of the cost of devices produced in accordance with 0.25 um pHEMT-technology;
- further production development of 0.1 um InP-technologies;

Revolutionary developments are observed in the technology of devices created on the basis of widebandgap semiconductor materials (SiC и GaN) [5,6].

Data on the outcome strength of the most effective commercially available power microwave transistors are given in Fig.1.

For the last decade the MMICs output power has grown 10 times, while the price of these devices has dropped by 3 to 8 and more times. The main parameters of modern microwave MMICs are given in Fig.2.

One more important tendency is the working out of effective multichannel power combiners. Here we should mention the excellent works of a group of authors from the University of California [22, 23].

As for transmitters of space communication, amplifiers with the power of hundreds of Watt in the centimeter- and tens of Watt in the millimeter ranges have been created. Parameters of such amplifiers are presented in the diagram of Fig.5.

Parameters of broadband amplifiers are given in the diagram of Fig.7. For the last decade the output power of C-X-Ku wideband power amplifiers has increased 10 to 20 times with a simultaneous growth of PAE from 3-5% to 10-15%.

In the coming years the interest to broadband amplifiers will grow due to the newest developments of new principles and systems of communications and radars on the basis of ultrawideband signals.

Transistor amplifiers begin their attack on the power ranges of 100 to 1000 Watt, and in the nearest future this process will accelerate due to the development of widebandgap microwave semiconductors and devices.