

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СВЧ УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ НА НИТРИДЕ ГАЛЛИЯ - СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Кищинский А.А.

ЗАО «Микроволновые системы»

Россия, 105120, Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д.11

Тел.: +7(495 917-21-03; e-mail: ak@mwsystems.ru

Аннотация – Рассмотрен мировой технический уровень и тенденции развития технологии мощных СВЧ транзисторов и интегральных схем на нитриде галлия, мощных усилителей на их основе.

I. Введение

Развитие технологии СВЧ приборов на широкозонных полупроводниковых материалах в последние три года привело к существенным практическим результатам и освоению мощных СВЧ транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) на нитриде галлия (GaN) в промышленном производстве. Целью настоящей работы является анализ достигнутых технических параметров GaN-транзисторов и МИС, а также транзисторных усилителей высокого уровня мощности (10-100 Вт и более) на их основе и основных тенденций развития этого класса СВЧ устройств. Основное внимание уделено практическим промышленным результатам и возможностям создания широкополосных приборов.

II. Основная часть

Интерес разработчиков мощных полупроводниковых усилителей к GaN-транзисторам (а точнее, к транзисторам на основе гетероструктур AlGaIn/GaN) обусловлен рядом важных свойств широкозонных полупроводниковых соединений вообще, и нитрида галлия, в частности. Не повторяя сведений, подробно обсуждавшихся в ранее опубликованных обзорных работах [1-5], отметим важнейшие (см. таблицу 1).

Таблица 1.

Параметры	Si	AlGaAs /InGaAs	SiC	AlGaIn /GaN	InP ГС
Ширина запрещенной зоны, eV	1.1	1.4	3.2	3.4	1.35
Подвижность электронов, см ² /Vs	1350	8500	700	2000	10000
Дрейфовая скорость насыщения электронов, *10 ⁷ см/s	1.0	2.0	2.0	2.5	2.3
Концентрация электронов области 2D-электронного газа, см ⁻²	--	3*10 ¹²	--	(1-2) *10 ¹³	4*10 ¹²
Критическая напряженность электрического поля, MV/cm	0.3	0.4	2.0	3.3	0.5
Теплопроводность, W/cm*К	1.5	0.5	4.5	1.3	0.7

Максимальная ширина запрещенной зоны обуславливает возможность работы транзистора при высоких уровнях активирующих воздействий (температуры, радиации). Очень высокая концентрация электронов в области двумерного электронного газа в сочетании с приемлемой подвижностью электронов дает возможность реализации большой плотности тока в сечении канала транзистора и высокого коэффициента усиления. Максимальная критическая

напряженность электрического поля позволяет реализовать пробивные напряжения в 100-300 В и поднять рабочее напряжение стока до 50-100 В, что в сочетании с высокой плотностью тока обеспечивает удельную выходную мощность промышленных GaN-транзисторов 3-10 Вт на 1 миллиметр ширины затвора (до 30 Вт/мм в лабораторных образцах), что на порядок превышает удельную выходную мощность арсенидгаллиевых (GaAs) транзисторов. Проблемными моментами, сдерживающими развитие GaN-приборов являются задача обеспечения адекватного теплоотвода от активной структуры и необходимость выращивания эпитаксиальных структур GaN на чужеродных (отличающихся по параметрам кристаллической решетки, тепловому расширению и т.д.) подложках, из-за невозможности реализации высокоомной подложки собственно GaN.

Приборное направление GaN-транзисторов и МИС достаточно молодо. Первые демонстрации эффективных транзисторных гетероструктур AlGaIn/GaN, выявляющие их основные преимущества и перспективы, относятся к 1991-1994 г.г. В конце 90-х годов появляются первые образцы GaN МИС усилителей, одновременно формируются и начинают выполняться военные и государственные программы развития данного направления [3] – американская программа WBGSTI, позднее европейские MARCOS, TIGER, KORRIGAN [6], японская NEDO. В то же время практически все ведущие мировые электронные компании, так или иначе связанные с производством GaAs-компонентов, начинают собственные инвестиции в технологию GaN-приборов. Эти инвестиции приносят свои плоды и в 2006-2007 г.г. анонсируются, а затем и реально появляются на рынке коммерческие GaN-продукты: корпусированные мощные универсальные и диапазонные транзисторы в диапазоне частот до 2-4 ГГц с выходной мощностью от 5 до 50 Вт (несколько позднее – до 120-180 Вт). Пионерами выхода на коммерческий рынок стали компании Eudyna, Nitronex, Cree и RFHIC, чуть позднее к ним присоединяются Toshiba, RFMD, TriQuint, OKI, NXP и ряд других компаний. В 2008 году появляются первые коммерческие МИС (широкополосные усилители мощности до 6 ГГц) фирмы Cree, в 2009 году анонсируются широкополосные 10-Вт МИС усилители с полосой 2-17 ГГц компанией TriQuint [7].

Основные параметры универсальных (не содержащих встроенных диапазонных согласующих цепей) корпусированных GaN-транзисторов приведены в таблице 2.

Видно, что основной функциональный состав (5-8 типов от 10 до 120 Вт) и параметры транзисторов всех производителей близки, исключением являются транзисторы серии TGF2023 фирмы TriQuint, поставляемые в виде кристаллов и работоспособные до частот 20 ГГц и более. Универсальные корпусные транзисторы поставляются в малогабаритных металлокерамических фланцевых или SMD-корпусах, имеющих относительно малые паразитные

емкости, и в зависимости от мощности и диапазона частот обеспечивают в непрерывном режиме полосу рабочих частот от 30% до октавы и более.

Таблица 2

Производитель, серия	Pout, W	Fmax, GHz	Gss, dB	Deff, %	Vds, V
Eudyna EGNBxx	12-120	0,9-3,5	13-18	60	50
Cree Inc. CGHxx	10-120	1,3-5	16-19	60-70	28
Nitronex NPTBxx	5-180	1-6	15-20	65	48
RFMD RF393x	10-120	0,9-2,7	15-23	60-70	48
OKI KGF72xx	50	-	15	--	50
TriQuint TGA2023xx	6 - 100	20	8-15	55	28-40

Свойства мощных внутрисогласованных транзисторов, выполняемых по различным технологиям можно проиллюстрировать данными таблицы 3, где приведены параметры выпускаемых серийно приборов уровня мощности 120 Вт, применяемых в системах связи стандарта W-CDMA в диапазоне 2 ГГц. Этот диапазон выбран намеренно, как «пограничный» между областями эффективного применения кремниевых и A_3B_5 -приборов.

Таблица 3

Параметры	Технология и тип транзистора		
	Si LDMOS Freescale MRF21120R6	GaAs MESFET Fujitsu FLL1200IU-2	GaN HEMT Cree CGH21120F
Pout (CW, -1dB), W	120	100	50-60
Pout (max), W	> 120	120	>115
Gss, dB	11	11	15
ΔF (-1dB), MHz	150	90	350
Deff (@Pmax), %	35	45	60-70
Deff (@W-CDMA), %	20	20-25	35
Vds, V	28	12	28
Tj,max, °C	200	175	225
Rt, °C/W	0.45	0.8	1.5
Dimensions	41 x 10 mm push-pull	34 x 17.4 mm push-pull	20 x 10 mm single

W-CDMA: Pout = 20W, ACRL < -35dB

Среди преимуществ GaN-прибора в этом применении очевидными являются существенно (в 2-4 раза) более широкая полоса рабочих частот и высокий КПД стока, как в режиме максимальной мощности, так и при усилении сложных сигналов со средней мощностью в 5 раз меньше. Кроме того достигнутые параметры реализуются в одиночном транзисторном каскаде, в то время как Si и GaAs транзисторы являются двухтранзисторными сборками (парами), требующими применения парафазных схем сложения мощностей, что значительно усложняет схему усилителя и увеличивает его массогабаритные параметры. Среди недостатков можно отметить «затянутость» динамической характеристики (компрессия усиления наблюдается при мощностях в 2-3 раза меньших максимальной) и высокую цену прибора в расчете на 1 Ватт выходной мощности.

Для оценки и сравнения возможностей применения GaN и GaAs транзисторов в схемах широко-

полосных 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 [8] 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 4.

Таблица 4

Параметры	GaAs pHEMT		GaN HEMT	
	типовые	TQ TGF2021 (1 mm)	типовые	TQ 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 ($G_{mх}$), 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. Достигнутое 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

ты, у обоих классов транзисторов примерно одинакова.

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

Приведенные соображения позволяют сделать обоснованное предположение о том, что 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. Это также подтверждается экспериментальными результатами, полученными в работе [9]. В качестве иллюстрации возможности «миграции» технических решений на рисунке 1 приведены расчетные АЧХ широкополосного усилительного каскада диапазона 4-8 ГГц, спроектированного на GaN-транзисторе типа TGF2023-02 фирмы TriQuint с шириной затвора 2.5 мм и выходной мощностью 12 Вт, в котором в качестве варианта включена модель GaAs транзистора типа TGF2021-02 той же фирмы с шириной затвора 2 мм и выходной мощностью 2 Вт. Для получения близких АЧХ потребовалось лишь на 50% скорректировать индуктивность присоединения затвора транзистора.

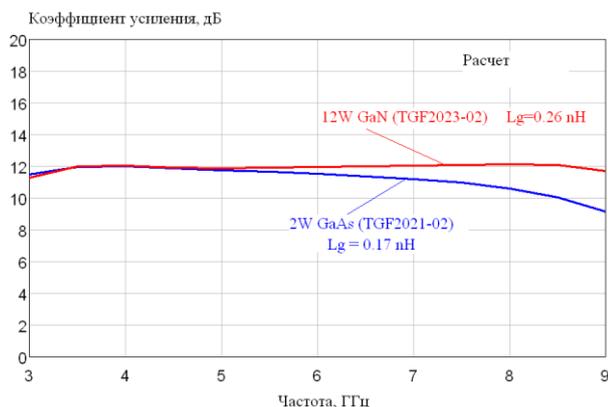


Рис. 1. АЧХ тест-схем 4-8 ГГц с моделями GaN и GaAs-транзисторов

Fig.2 4-8 GHz MIC amplifier design GaN vs GaAs transistor models

Промышленные технологии GaN-транзисторов, используемые в производстве коммерчески доступных приборов и технологии, находящиеся в лабораторной апробации характеризуются основными параметрами, приведенными в таблице 5. В 2008 году лишь одна компания (Cree Inc.) предоставляла сторонним разработчикам услуги (foundry-услуги) по изготовлению заказных GaN монолитных схем. О намерениях выхода на рынок GaN-foundry объявили TriQuint, RFMD, Selex и ряд других компаний.

Коммерчески доступные GaN монолитные усилители в виде кристаллов, либо в металлокерамических корпусах выпускаются компаниями Cree, MWT, анонсировали новые МИС компании TriQuint, RFMD.

Параметры и габариты некоторых типов МИС, как коммерчески доступных, так и описанных в публикациях, иллюстрирующие основные классы

усилительных устройств и диапазоны частот применения, приведены в таблице 6.

Таблица 5

Параметры	Значения	
	В производстве	В лабораторной апробации
Частотный диапазон, ГГц	до 6 (корпусные) до 20 (кристаллы)	до 110
Длина затвора, мкм	0,5 - 0,25	0,1
Удельная мощность, Вт/мм	4-6	до 30
Пробивное напряжение с-з, В	80-120	до 400
Рабочее напряжение стока, В	28, 40, 48, 50	до 150
КПД, %	55 - 60	
Выходная мощность с кристалла, Вт	120 (CW) 200 (pulse)	
Диаметр подложки, мм	75 мм	100-200
Тип подложки	SiC, Si, сапфир	SoD, SopSiC

Таблица 6

Тип	ΔF , GHz	P-3dB, W	Gss, dB	PAE, %	Конструкция
CMPA 2560025F Cree Inc.	2.5-6.0	25-37	23 - 27	> 30	Корпус МПЛ 13 x 13 мм
MGA-495940-02 MWT	4.9-5.9	10	12	--	Корпус QFN
[10] HRL Lab.	75 - 92	> 0.5	11 - 14	> 17	Кристалл 3.4 x 1.3 мм
[11] BAE Systems	4-18	3.2 - 4.4	10	16	Кристалл 4.2 x 4.9 мм
[12] ALCATEL, THALES, UMC, QinetiQ, XLIM	8-10	>30 (58 max)	13 - 16	>33 (38 max)	Кристалл 4.5 x 4.0 мм
[7] TriQuint	0.03-3	8-10	--	38	Корпус МПЛ 17 x 12 мм
[7] TriQuint	2-17	8-12	--	20	Кристалл

По сравнению с серийно выпускаемыми GaAs МИС новые изделия имеют в 2-10 раз большую выходную мощность и сравнимый, либо больший КПД при одинаковых или меньших размерах кристалла. Номенклатура выпускаемых GaN усилительных МИС пока в десятки (если не в сотни) раз меньше, чем GaAs МИС, однако, фаза промышленного освоения этой технологии только началась и следует ожидать в ближайшие 2-3 года резкого расширения предложений на этом рынке. В качестве иллюстрации (см. рисунок 2) темпов совершенствования параметров GaN МИС можно привести хронологию развития GaN МИС выходных усилителей X-диапазона для радарных систем с активными фазированными решетками, большое внимание которым уделяют военные, в связи с тем, что параметры таких МИС (в первую очередь КПД и выходная мощность) определяют важнейшие тактико-технические параметры таких радаров. На рисунке 3 показаны конструкции кристаллов 40-Ваттного GaN МИС усилителя X-диапазона [12] и самого мощного промышленного GaAs усилителя типа MAAPGM0079 фирмы M/A Com, пропорции размеров кристаллов соблюдены.

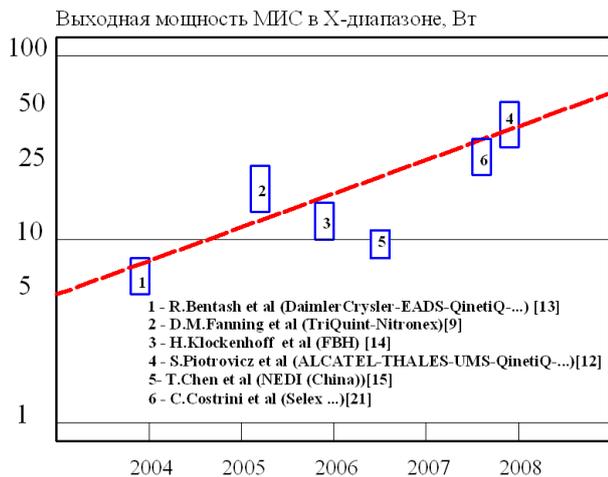


Рис.2. Параметры GaN ММС X-диапазона
 Fig.2 X-band GaN MMIC amplifiers parameters

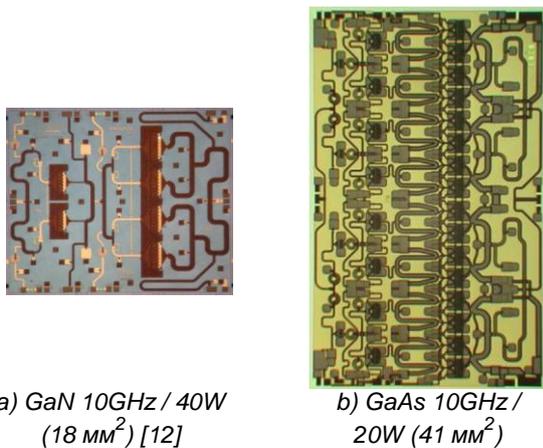


Рис.3. Конструкции GaN ММС усилителей
 Fig.3 GaN MMIC amplifiers layouts

Видно, что конструкция GaN усилителя существенно проще и имеет в 2.3 раза меньшие размеры, что дает хорошие шансы на увеличение выходной мощности GaN ММС в X-диапазоне еще в 2-3 раза и достижение рубежа в 100 Вт уже в ближайшее время.

Исследования временной стабильности параметров и надежности GaN транзисторов, проводившиеся интенсивно при отработке промышленных технологий, привели к достижению приемлемых показателей надежности для серийных приборов. В качестве примера на рисунке 4 приведена кривая Аррениуса для мощных GaN-транзисторов на кремниевой подложке фирмы Nitronex [16]. Показано, что при температуре активной зоны кристалла 150°C среднее время наработки до отказа превышает 10⁷ часов, энергия активации E_a = 2.0. При допустимой рабочей температуре кристалла T_j=200°C средняя наработка до отказа составляет 10⁵ часов. Продемонстрирована также стойкость приборов к рассогласованию нагрузки до KCBH = 10 в режиме большого сигнала. Быстрое (в течение нескольких часов) разрушение возникает в современных GaN-транзисторах при температурах активной зоны 320-350°C.

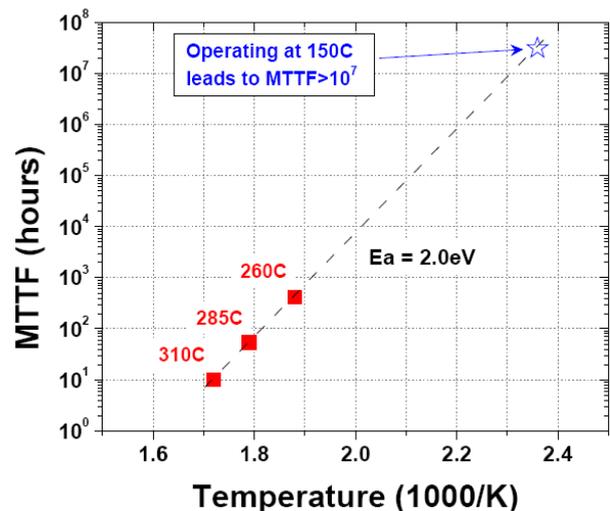


Рис.4. Кривая Аррениуса GaN транзистора [16]
 Fig.4 Arrhenius plot for GaN transistor [16]

Полученные показатели пока уступают показателям надежности современных GaAs pHEMT транзисторов (средняя наработка на отказ при T_j=200°C составляет 10⁶ часов, температура разрушения 370-390°C [17]), но дальнейшее быстрое совершенствование технологии GaN приборов должно наверстать это отставание. Предполагаемые максимальные рабочие температуры для GaN транзисторов могут составлять 350-400°C [18]. Рабочие параметры GaN транзисторов с шириной затвора 2.8 мм (выходная мощность 10 Вт) на подложке SiC при увеличении температуры кристалла до 300°C исследованы в работе [19]. Малосигнальный коэффициент усиления при изменении температуры от 50 до 300°C снижается на 6 дБ, выходная мощность насыщения на 1.5 дБ, максимальный ток канала и крутизна примерно в 2 раза.

Существенные преимущества GaN-транзисторов проявляются упрощении в конструкции и увеличении выходной мощности сверхширокополосных (с перекрытием по частоте более октавы) усилителей мощности. Параметры нескольких типов таких серийных приборов приведены в таблице 7.

Таблица 7

Тип	ΔF, GHz	P-3dB, W	G _{ss} , dB	PAE, %	V _{dc} , V
Aethercomm SSPA 0.5-3.0-50	0.5-3.0	70-100	31	13-19	50v
Aethercomm SSPA 0.8-2.5-200	0.8-2.5	100-200	47	11-22	50v
EMPower BBM3T6AMQ	0.96-3.0	> 160	56	23	28v
Stealth Microwave SM2560-47GN	2.5-6.0	50	48	25	28v

Габаритно-весовые характеристики широкополосных усилителей, использующих GaN транзисторы, существенно превосходят таковые у GaAs усилителей. При одинаковой выходной мощности и усилении габариты и масса (без радиатора охлаждения) GaN-усилителя в 2-4 раза меньше, чем у аналогичного GaAs-усилителя.

Одним из направлений применения GaN транзисторов является совершенствование характеристик импульсных твердотельных радаров в L-, S- и X-диапазонах. О параметрах GaN МИС для радаров X-диапазона на основе АФАР упоминалось выше. В работе [20] описан выходной широкополосный приемо-передающий модуль АФАР, работающий в диапазоне частот от 8.7 до 11.5 ГГц, включающий четыре GaN МИС: малошумящий входной усилитель с коэффициентом шума 1.8 дБ и стойкостью к непрерывному входному сигналу 4 Вт, предварительный усилитель с выходной линейной мощностью 4-5 Вт и два выходных усилителя с выходной мощностью 14-20 Вт каждый. Модуль в целом (на выходе циркулятора) обеспечивает выходную мощность в режиме передачи 20 Вт и коэффициент шума в режиме приема 3 дБ. Специалистами института NEDI (Нанкин, КНР) продемонстрированы четырехкристалльный внутрисогласованный транзистор X-диапазона с выходной мощностью в непрерывном режиме 110 Вт и КПД 38% [22]. В S-диапазоне (2.9-3.3 ГГц) уровень импульсной выходной мощности GaN транзисторов приближается к 1000 Вт при КПД более 50% [23] для импульсного режима со скважностью 10 и длительностью импульса 200 нс. При этом наклон вершины импульса за 200 нс составил 0.31 дБ, а дрейф фазы менее 4 градусов.

Большой интерес разработчики GaN приборов проявляют к широкополосным системам связи, в первую очередь – к применению GaN транзисторов в базовых станциях стандартов W-CDMA, UMTS и Wi-MAX. Прогнозируется, что к 2012 году в общем объеме выпуска GaN приборов рынок применения в широкополосных коммерческих системах связи и телевидения будет составлять 63% против 26% рынка применения в военных системах [24]. Развитие этого направления идет как за счет совершенствования параметров самих GaN транзисторов [25] (увеличение выходной мощности и КПД, подавление «эффектов памяти»), так и за счет применения известных схем повышения эффективности усилителей базовых станций – использование схем Догерти [26], применение различных режимов высокочастотного усиления (режимы класса E [27], F [28] и другие). При достаточно высокой цене самих GaN транзисторов, их коммерческий успех связывают с такими преимуществами на системном уровне, как:

- простота (и дешевизна) схемотехнической реализации мощных усилителей;
- простота получения широких полос усиления, перекрытие одним мощным усилителем нескольких поддиапазонов станции;
- снижение энергопотребления базовой станции и связанных с ним издержек;
- уменьшение сложности и стоимости систем охлаждения.

Активно осваиваются GaN приборами диапазоны 2.1 ГГц, 3.5 ГГц, 5-6 ГГц. При мощностях усилителей уровня 10 Вт в диапазоне 2 ГГц продемонстрированы значения КПД более 70-80%, при уровне 100 Вт реализованы КПД 55-65%.

Одним из очевидных применений GaN транзисторов и МИС являются системы радиопротиводействия, традиционно перекрывающие многооктавные полосы частот в дециметровом и сантиметровом диапазонах. Одной из целевых задач, например, американской программы WBGSTI была разработка МИС усилителя в диапазоне 2-10 ГГц с выходной мощностью 15 Вт, и на ее основе усилительного мо-

дulia с выходной мощностью 100 Вт [3]. Эта задача уже близка к реализации, компанией TriQuint разработан монолитный усилитель с полосой 2-17 ГГц и выходной мощностью 8-12 Вт [7]. Отметим, что современные серийные GaAs МИС в этом диапазоне имеют выходную мощность 1 Вт.

В России исследования и разработки эпитаксиальных структур нитрида галлия и транзисторов на их основе проводятся рядом предприятий и научных учреждений. Среди них – ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН, ОАО «Светлана-Рост», ФГУП «НПП «Пульсар», ФГУП «НПП «Исток», ЗАО «Элма-Малахит», ИСВЧ-ПЭ РАН, ФГУП «Гиредмет», ИФП РАН и ряд других организаций [29]. Разработаны образцы мощных и малошумящих GaN транзисторов, находящиеся в стадии лабораторных исследований. В промышленном освоении приборов, к сожалению, российские предприятия пока значительно отстают от ведущих зарубежных компаний.

III. Заключение

В 2006 – 2007 годах были решены основные производственные и технологические проблемы, не позволявшие GaN транзисторам и монолитным интегральным схемам СВЧ выйти на коммерческий рынок. С этого момента началось активное внедрение технологии нитрида галлия в СВЧ промышленность, как военную, так и коммерческую. Темпы промышленного освоения новой технологии существенно (в 2-3 раза) превышают темпы, которыми развивались технологии Si- и GaAs-приборов. В ближайшее десятилетие частотный диапазон 1-50 ГГц станет ареной серьезной борьбы двух промышленных технологий мощных твердотельных интегральных схем, практически равных по частотным и усилительным свойствам, одна из которых обладает серьезными преимуществами в параметрах (GaN), другая (GaAs) – в себестоимости и уровне освоенности в массовом производстве.

IV. Список литературы

- [1] В.Н.Данилин и др. Мощные высокотемпературные и радиационно-стойкие СВЧ приборы нового поколения на широкозонных гетеропереходных структурах Al-GaN/Ga // *Обзоры по электронной технике, Сер.1. СВЧ техника, 2001, вып.1.*
- [2] А.Васильев и др. Новое поколение полупроводниковых материалов и приборов. Через GaN к алмазу // *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, №4, 2007, 68-76.*
- [3] И.Викторов, Н.Кичаева. GaN – технология - новый этап развития СВЧ-микросхем // *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2007, №4, 80-85.*
- [4] H. Okumura. Present Status and Future Prospect of Widegap Semiconductor High-Power Devices // *Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 45, No. 10A, 2006, pp. 7565-7586*
- [5] *Wide energy bandgap electronic devices / edited by Fan Ren, John C. Zolper // World Scientific Publishing Co., 2003*
- [6] G. Gauthier. KORRIGAN: Development of GaN HEMT Technology in Europe // *CS MANTECH Conference, 2006, p.p. 49-51*
- [7] G. Wilcox, M. Andrews. TriQuint Delivers High Power - Wideband GaN Technology // *Microwave Product Digest, 2009, №1.*
- [8] S.C. Cripps. *RF Power Amplifiers for Wireless Communications//Boston-London, Artech House, 1999.*
- [9] D. M. Fanning et al. 25 W X-band GaN on Si MMIC // *GaAs*

Mantech Conference Proceedings, 2005

- [10] M.Micovic. GaN MMIC PAs for MMW Applicaitons // MMIC Array Receivers and Spectrographs Workshop, California Institute of Technology, July 2008.
- [11] D.E. Mehary et al. Multi-Watt Wideband MMICs in GaN and GaAs // 2007 IEEE MTT Symposium Digest, p.p. 631-634
- [12] 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
- [13] R. Behtash et al. Coplanar AlGaIn/GaN HEMT power amplifier MMIC at X-band //// 2007 IEEE MTT Symposium Digest, p.p. 1657-1659
- [14] H. Klockenhoff et al. A Compact 16 Watt X-Band GaN-MMIC Power Amplifier // IEEE MTT-S Digest, 2006, p.p. 1846-1849
- [15] T.Chen et al. X-Band 11W AlGaIn/GaN HEMT Power MMICs // EwMIC Conference Proceedings, 2007, p.p. 162-164
- [16] S. Singhal et al. Qualification and Reliability of a GaN Process Platform // CS MANTECH Conference, May 14-17, 2007, p.p. 83-86
- [17] D. Leung et al. High-Reliability Deep Submicron GaAs Pseudomorphic HEMT MMIC Amplifiers // CS MANTECH Conference, 2001
- [18] В.Данилин и др. Транзистор на GaN пока самый «крепкий орешек» // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, №4, 2004, стр.20-29.
- [19] N.Adachi et al. High Temperature Operation of AlGaIn/GaN HEMT // 2005 IEEE MTT Symposium Digest
- [20] P. Schuh. GaN MMIC based T/R-Module Front-End for X-Band Applications // EwMIC Conference Proceedings, 2008, p.p. 274-277
- [21] 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
- [22] ShiChang Zhong et al. AlGaIn/GaN HEMT with over 110 W Output Power for X-Band // EwMIC Conference Proceedings, 2008, p.p. 91-94
- [23] E.Mitani et al. An 800-W AlGaIn/GaN HEMT for S-band High-Power Application // CS MANTECH Conference, May 14-17, 2007, p.p. 213-216
- [24] GaN RF Market Analysis 2008. Report // YOLE DEVELOPEMENT, 2007
- [25] A.Wakejima et al. 370-W Output Power GaN-FET Amplifier with Low Distortion for W-CDMA Base Stations // 2006 IEEE MTT Symposium Digest, p.p. 1360-1363
- [26] M.J.Pelk et al. A High-Efficiency 100-W GaN Three-Way Doherty Amplifier for Base-Station Applications // IEEE Transactions on MTT, 2008
- [27] Y.Lee et al. A High-efficiency Class-E GaN HEMT Power Amplifier for WCDMA Applications // IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, №8, p.p. 622-624
- [28] D.Schmelzer, S.I.Long. A GaN HEMT Class F Amplifier at 2 GHz with > 80 % PAE // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2007, №10, p.p. 2130-2136
- [30] НИТРИДЫ ГАЛЛИЯ, ИНДИЯ И АЛЮМИНИЯ – СТРУКТУРЫ И ПРИБОРЫ Тезисы докладов 6-й Всероссийской конференции, 18–20 июня 2008 года, Санкт-Петербург