

А.А. Коколов, М.В. Черкашин

## Построение и характеристики СВЧ монолитных усилителей мощности на основе полупроводниковых материалов GaAs и GaN

Приведен обзор схем построения и характеристик монолитных усилителей мощности (УМ) на основе полупроводниковых материалов GaAs и GaN. Описаны преимущества применения гетероструктурных СВЧ-транзисторов на основе широкозонных материалов. Обзор будет полезен инженерам, занимающимся разработкой СВЧ-устройств.

**Ключевые слова:** усилитель мощности, монолитная интегральная схема, GaAs HEMT, GaN HEMT.

Развитие полупроводниковых технологий мощных СВЧ-транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) связано с необходимостью совершенствования различных радиоэлектронных и телекоммуникационных систем СВЧ-диапазона (в первую очередь систем связи). К таким системам, наиболее активно стимулировавшим развитие СВЧ полупроводниковых технологий и бурно развивавшимся 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). В свою очередь, совершенствование параметров и снижение себестоимости мощных транзисторов и МИС существенно расширяют возможности их применения в аппаратуре, возможности создания и продвижения на рынок новых систем.

В настоящей статье представлен обзор схем построения и характеристик монолитных усилителей мощности (УМ) на основе полупроводниковых материалов GaAs и GaN. Материал GaAs традиционно используется в технологиях изготовления мощных СВЧ-транзисторов и монолитных УМ, в то время как технологии на базе GaN еще исследуются, но обещают большие перспективы.

**Тенденции развития технологий изготовления монолитных СВЧ УМ.** В развитии базовых для микроволнового диапазона  $A_3B_5$ -полупроводниковых технологий можно выделить следующие основные тенденции [1]:

– Постепенный уход с арены классической технологии полевых транзисторов с однородным легированием канала (MESFET). Эта технология остается в производстве традиционных и хорошо освоенных высокомошных внутрисогласованных и отдельных типов универсальных дискретных транзисторов сантиметрового диапазона и серии МИС усилителей сантиметрового диапазона.

– Существенное снижение стоимости приборов, изготавливаемых по технологии псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов (pHEMT) с размерами затвора 0,1–0,25 мкм. Эта технология стала стандартной и предоставляется практически всеми фирмами, выполняющими услуги по контрактному производству (*founndry*) СВЧ МИС. Использование такой технологии позволило наладить серийный выпуск монолитных усилителей мощности (УМ) в диапазоне частот до 40 ГГц с мощностями до 4 Вт. В последнее время получила развитие технология создания GaAs mHEMT МИС с высоким содержанием индия. При этом удалось не только улучшить характеристики пробивного напряжения и плотности тока стока, но и продвинуться в частотном диапазоне до 160 ГГц.

– Освоение в производстве технологий СВЧ МИС на InP с размерами затвора 0,1–0,25 мкм, что дает возможность продвижения монолитных усилителей в диапазон до 200 ГГц.

Обозначенные выше процессы обусловлены потребностями массового производства недорогих МИС миллиметрового диапазона. Революционным же направлением развития мощных СВЧ-компонентов, родившимся в прошедшем десятилетии, стало направление широкозонных полупроводниковых материалов, к которым относятся нитрид галлия GaN и карбид кремния SiC, и приборов на их основе. Это направление, активно поддерживаемое военными ведомствами, должно позволить в несколько раз повысить выходную мощность транзисторов и МИС сантиметрового и миллиметрового диапазонов. 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 GaN реализованы удельные мощности транзисторной структуры 5–10 Вт/мм и более, что на порядок превышает удельную мощность GaAs-транзисторов. Большое значение теплопроводности GaN приводит к увеличению времени работы устройств и снижению требований к системе охлаждения. 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 [2].

В сантиметровом диапазоне выходная мощность GaAs МИС, по-видимому, уже достигла предела (порядка 10–20 Вт), связанного с ограничением максимальной площади кристалла (25–30 мм<sup>2</sup>), при которой он (при толщине 50–100 мкм) становится предельно хрупким, и процент выхода годных при монтаже МИС резко падает. Площади кристаллов МИС миллиметрового диапазона составляют 12–16 мм<sup>2</sup>, 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 гетеро-биполярных транзисторов (HBT) на основе материалов группы A<sub>3</sub>B<sub>5</sub>, 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.

Для демонстрации на рис. 1 изображены два монолитных УМ X-диапазона, изготовленных по GaN- и GaAs-технологии [3]. По сравнению с GaAs-усилителем ( $P_{out} = 20$  Вт,  $S=41$  мм<sup>2</sup>) мощный СВЧ-усилитель, выполненный по GaN-технологии, обладает большей выходной мощностью при меньших геометрических размерах ( $P_{out} = 40$  Вт,  $S = 18$  мм<sup>2</sup>). Кроме того, схематехника усилителей, выполненных на GaN, более простая, так как требует суммирования мощности меньшего числа каскадов.

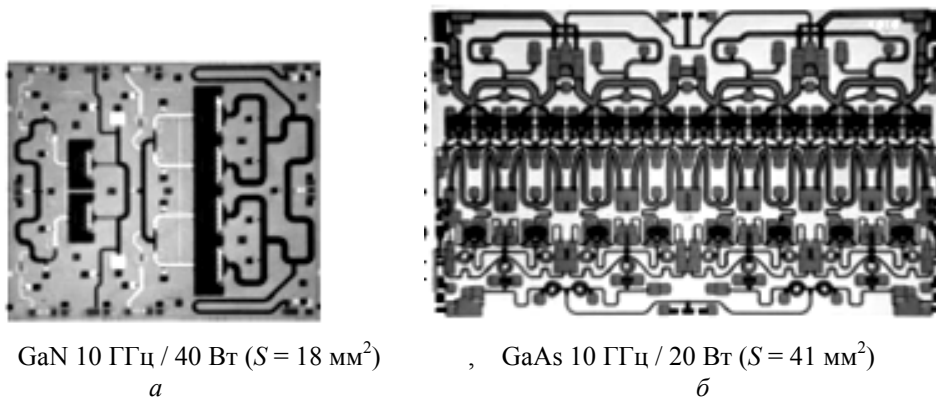


Рис. 1. Мощные СВЧ-усилители, выполненные по GaN- (а) и GaAs- (б) технологиям

Сравнительный анализ частотно-мощностных параметров существующих коммерческих технологий изготовления СВЧ МИС показан на рис. 2.

Таким образом, для построения СВЧ УМ в диапазоне частот до 5–10 ГГц конкурентоспособными являются SiC и GaAs-HBT-технологии, в диапазоне частот до 50 ГГц с точки зрения выходной мощности нет равных транзисторам на основе материала GaN, но для более высоких частот перспективной является технология GaAs HEMT [4].

Однако уже сейчас есть публикации, в которых приводятся экспериментальные GaN СВЧ МИС, работающие в диапазоне частот до 90 ГГц [5]. Видимо, не за горами появление коммерческой GaN-технологии, имеющей высокие рабочие частоты.

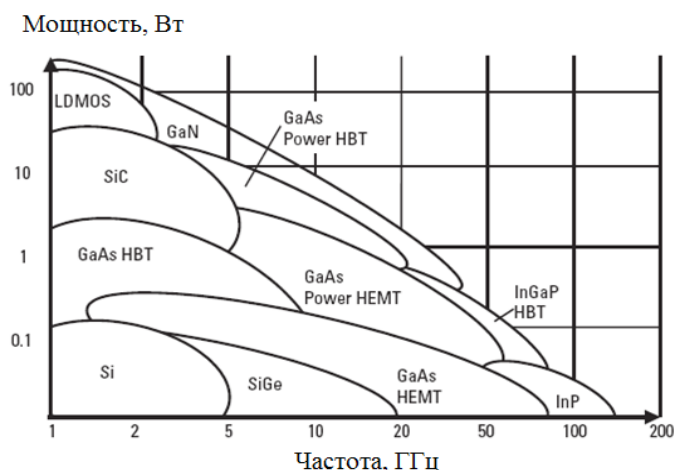


Рис. 2. Технологии изготовления СВЧ МИС

Перечисленные преимущества транзисторов на основе GaN-технологии позволяют утверждать, что область их применения в будущем будет только возрастать.

Рассмотрим способы построения и сравним характеристики современных GaAs и GaN УМ, предоставляемых различными зарубежными фирмами.

**Монолитные СВЧ УМ на основе GaAs.** При построении монолитных СВЧ УМ на основе GaAs можно выделить три основные наиболее используемые структурные схемы:

а) параллельно включенные каскады со сложением мощности на основе делителей мощности Вилкинсона, выполненных на сосредоточенных или распределенных элементах (рис. 3, а);

б) балансные схемы построения УМ с применением направленных ответвителей (рис. 4, а);

в) схемы сложения мощности с использованием параллельных СЦ (рис. 5, а).

На рис. 3, б, 4, б и 5, б показаны топологии GaAs рHEMT УМ, выполненных на основе указанных принципов. Возможны также различные комбинации описанных способов. В частности, на рис. 5 представлен балансный УМ, каждый из каналов которого построен по схеме сложения на основе параллельных СЦ.

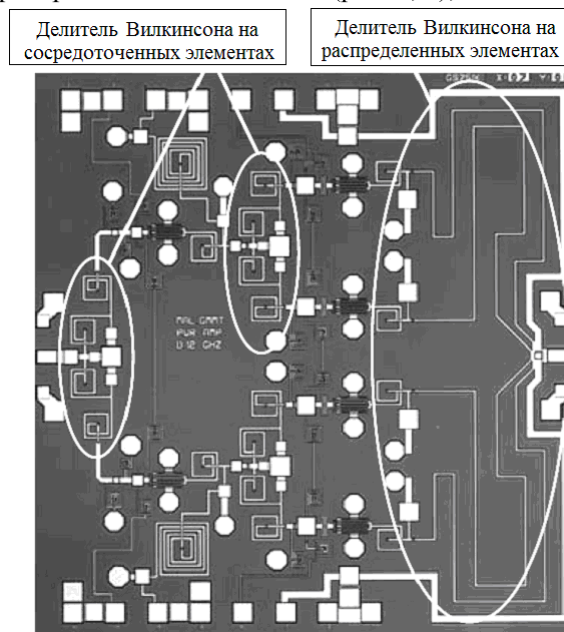
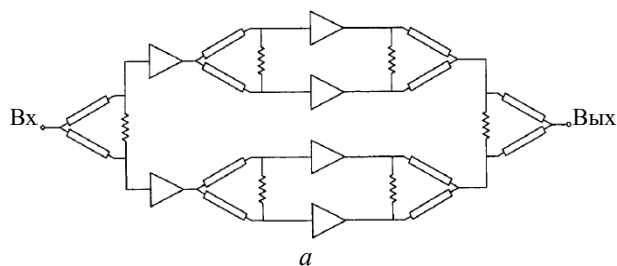


Рис. 3. УМ со сложением мощности на основе делителей мощности Вилкинсона на распределенных элементах – а; б – усилитель X-диапазона с выходной мощностью 2 Вт

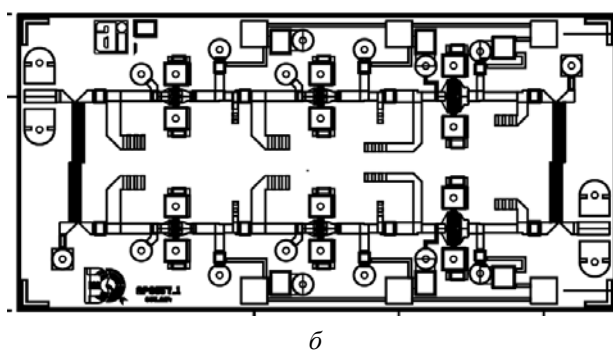
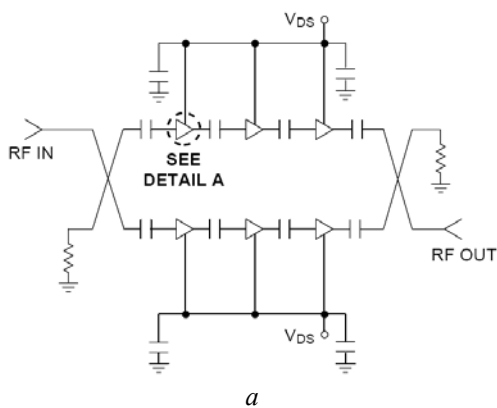


Рис. 4. Балансный УМ – а; б – усилитель диапазона частот 37–39 ГГц с выходной мощностью 80 мВт

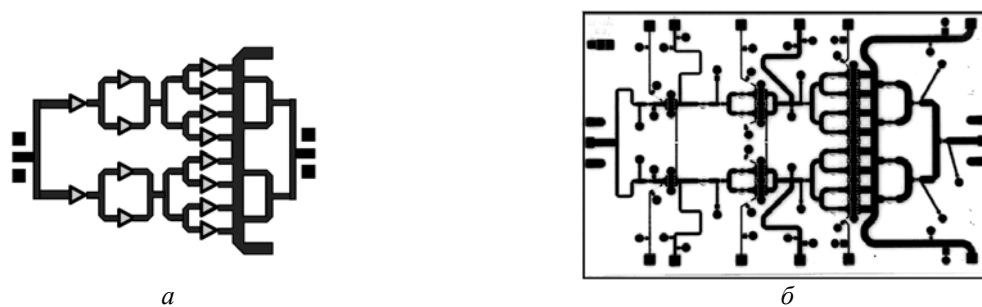


Рис. 5. УМ со сложением мощности на основе параллельных СЦ – а; б – усилитель X-диапазона с выходной мощностью 7,5 Вт

Другие топологии СВЧ УМ на основе GaAs-pHEMT-технологий показаны на рис. 7, 8. Конструкции современных монолитных УМ имеют следующие характерные особенности (см. рис. 7, 8):

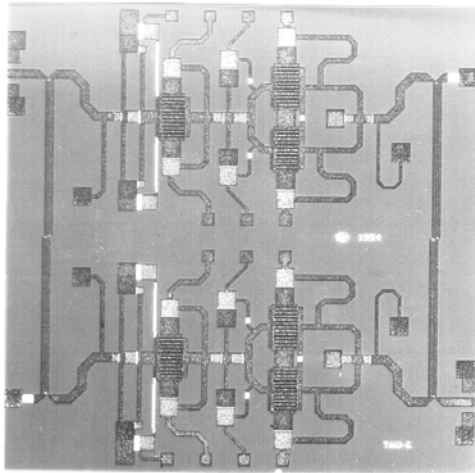
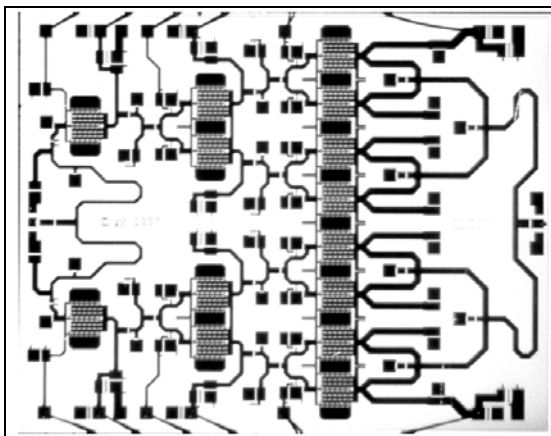
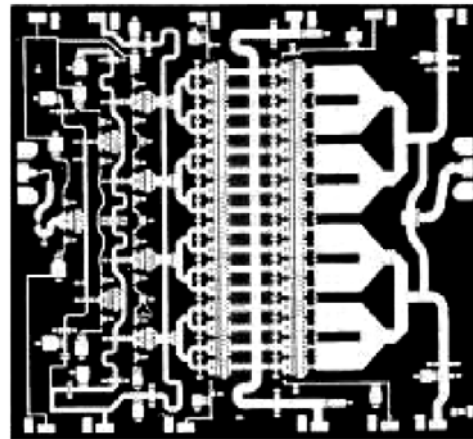


Рис. 6. УМ X-диапазона с выходной мощностью 2 Вт

- полная симметрия схемы;
- очень высокая плотность компоновки;
- использование максимально простых входных и межкаскадных СЦ, чаще всего на сосредоточенных элементах;
- разбиение выходной транзисторной структуры на большое (4, 8, 16) число отдельных структур с реализацией так называемых «корпоративных» согласующих цепей – СЦ (объединение индивидуальных СЦ субтранзисторов в общую синфазно-связанную распределенную цепь);
- использование в выходных каскадах «широких» транзисторов с общей длиной затвора до 2–5 мм (см. рис. 7, а);
- относительно широкие, с применением распределенных элементов, выходные СЦ (см. рис. 7, б);
- использование толстых (до 12 мкм) гальванических линий.



а



б

Рис. 7. УМ X-диапазона на основе GaAs-pHEMT-технологии

Следует отметить, что GaAs HEMT УМ с частотами выше 30-40 ГГц чаще выполняются в копланарном исполнении (см. рис. 8).

Ведущими производителями МИС УМ СВЧ-диапазона на основе GaAs являются следующие фирмы: TriQuint (США), UMS (Франция), Mimix (США), Hittite (США), Skyworks Inc. (США), Eudyna (Тайвань), RFMD (США) и др. Параметры ряда коммерческих монолитных УМ, выполненных на основе GaAs HEMT технологий, приведены в табл. 1.

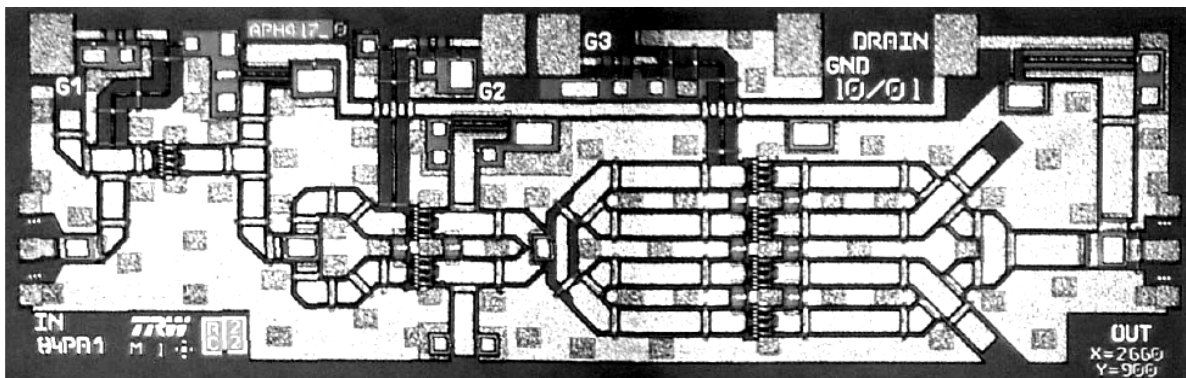


Рис. 8. Копланарный УМ диапазона частот 75–95 ГГц на основе 0,25 мкм GaAs-HEMT-технологии

Таблица 1

Характеристики монолитных усилителей мощности на основе GaAs-HEMT-технологий

№	Фирма	Диапазон частот, ГГц	G, дБ	S <sub>11</sub>  , дБ	S <sub>22</sub>  , дБ	P <sub>1out</sub> , дБм	U <sub>питр</sub> , В	I <sub>DS</sub> , мА	Наименование	Тип	Раз-р, мм	Технология
1	TriQuint	9–10,5	20±0,5	-10	-10	38	7–9	1400–1050	TGA2704	Сложение мощностей	3,52×2,61	0,25 GaAs pHEMT
2	TriQuint	13–18	24±1,0	-12	-12	38	8	2600	TGA2514	Сложение мощностей+балансный	2,87×3,9	0,25 GaAs pHEMT
3	TriQuint	24–31	23±1,0	-6	-12	35,5	6	2100	TGA4505	Сложение мощностей	4,29×3,02	0,25 GaAs pHEMT
4	TriQuint	41–46	17±1,0	-16	-16	33	6	2000	TGA4046	Сложение мощностей+балансный	3,45×4,39	0,15 GaAs pHEMT
5	Hittite	12–16	28±1,0	-15	-16	36,5	7	2400	HMC950	Сложение мощностей+балансный	3,23×3,45	GaAs pHEMT
6	Hittite	16–24	23±1,0	-15	-16	32	7	790	HMC756	Сложение мощностей+балансный	2,4×1,6	GaAs pHEMT
7	Hittite	55–65	13±1,0	-13	-17	16	5	80	HMC-ABH209	Сложение мощностей+балансный	2,2×1,22	GaAs HEMT
8	Hittite	81–86	12	-7	-8	19	4	240	HMC-A3H634	Каскадный	2,57×1,7	GaAs HEMT
9	Mimix	12–16	21±1,0	-12	-10	25	5	500	P1042-BD	-	-	GaAs pHEMT
10	Mimix	24–34	16	-8	-8	24	6	320	P1023-BD	Каскадный	2,55×0,63	GaAs pHEMT
11	Mimix	30–36	16±0,5	-16	-20	24	5	440	P1017-BD	Балансный	2,5×3,3	GaAs pHEMT
12	Mimix	36–42	25±0,5	-	-12	26	4,5	530	X1001-BD	Сложение мощностей	3,0×1,7	GaAs pHEMT
13	Mimix	43,5–46,5	13±1,0	-20	-20	31	5	2800	XP1015-BD	Сложение мощностей+балансный	4,63×4,65	GaAs pHEMT
14	Eudyna	9,5–13,3	26±1,5	-10	-10	33	6	1500	EMM5068X	Сложение мощностей	3,53×2,83	GaAs HEMT
15	Eudyna	37–40	21±0,5	-10	-15	27	6	600	EMM5835X	Сложение мощностей	4,05×1,34	GaAs HEMT
16	Eudyna	57–64	17	-7	-10	16	3	150	FMM5715X	Сложение мощностей	2,19×0,92	GaAs HEMT
17	UMS	5–18	24±2,0	-8	-8	33	8	1000	CHA6518-99F	Сложение мощностей	5,23×3,26	0,25 GaAs pHEMT
18	UMS	30–40	23,5±1,5	-6	-12	22	3,5	500	CHA5294	Сложение мощностей	4,1×1,42	0,15 GaAs pHEMT

**Монолитные СВЧ УМ на основе GaN.** Рассмотрим коммерческие и экспериментальные разработки монолитных СВЧ УМ на основе GaN-HEMT-технологий. Принципы построения таких усилителей практически такие же, что и GaAs УМ.

На рис. 9–11 показаны топологии СВЧ УМ, выполненных на основе GaN-технологий. В основном большинство разработок по GaN СВЧ МИС находятся в стадии исследования, особенно это касается усилителей с рабочими частотами выше 20 ГГц. С другой стороны, усилительные модули на основе GaN корпусированных транзисторов и интегральных схем вытесняют традиционные GaAs-устройства с рынка широкополосных систем связи W-CDMA, UMTS и Wi-MAX.

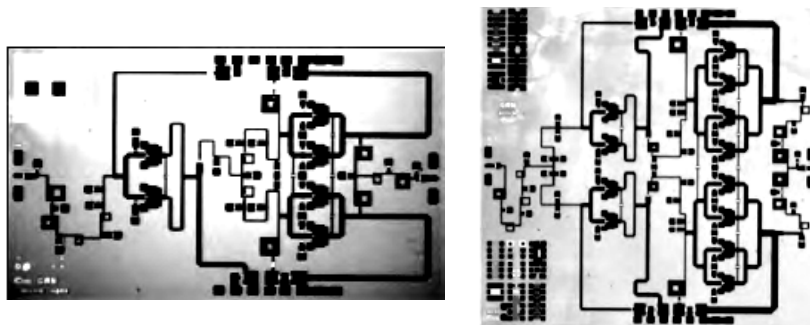


Рис. 9. УМ диапазона частот 2–6 ГГц на основе 0,25 мкм GaN-HEMT-технологии компании Selex Sistemi Integrati (слева УМ на 40 дБм, справа – на 42 дБм) [6]



Многие компании (RFMD, Triquint, Skyworks и др.) поставляют готовые усилительные блоки на GaN с выходной мощностью более 100 Вт, ориентированные на использование в вышеперечисленных беспроводных системах.

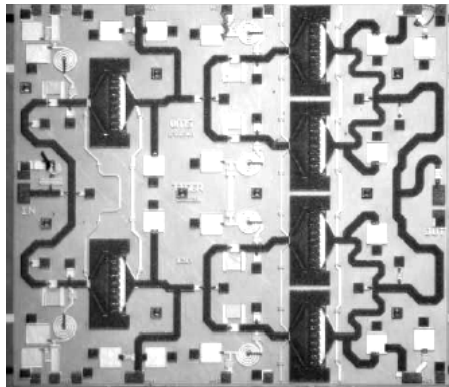


Рис. 10. УМ X-диапазона на основе 0,25 мкм GaN-HEMT-технологии, разработанный в рамках проекта «Korrigan» ( $P_{out} = 43$  Вт, PAE = 52%) [7]

Так же как и в случае GaAs УМ, для усилителей на основе GaN-технологий характерно использование копланарных линий (рис. 12).

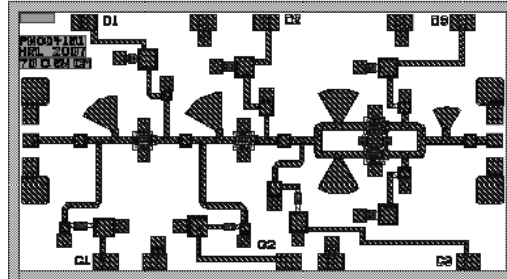


Рис. 11. УМ диапазона частот 70–80 ГГц на основе 0,12 мкм GaN-HEMT-технологии ( $P_{out} = 0,5$  Вт; PAE = 52%) [8]

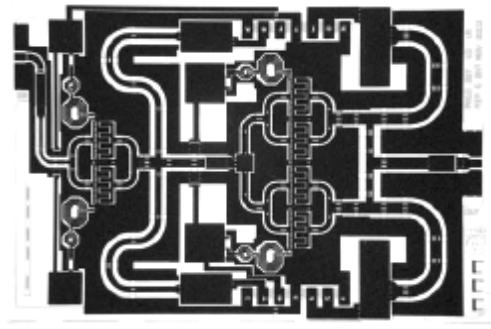
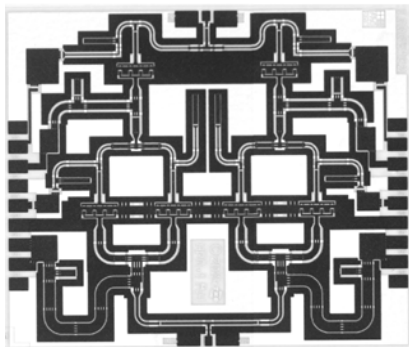


Рис. 12. Копланарные УМ X-диапазона частот на основе 0,25 мкм GaN-HEMT-технологии

Ведущими производителями МИС УМ СВЧ-диапазона на основе GaN являются следующие фирмы: TriQuint (США), Eudyna (Тайвань), RFMD (США), Cree (США), Nitronex (США), Raytheon (США), Fraunhofer (Германия), HRL (США), Selex (Италия) и др. Параметры некоторых коммерческих монолитных и корпусированных усилителей мощности, а также транзисторов, выполненных на основе GaN-технологий, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики усилителей мощности на основе HEMT-GaN-технологий

№	Фирма	Диапазон частот, ГГц	G, дБ	S <sub>11</sub>  , дБ	S <sub>22</sub>  , дБ	P <sub>1out</sub> , дБм	U <sub>пит.</sub> , В	I <sub>DS</sub> , мА	Наименование	Тип	Технология
1	TriQuint	0,03–3	19,5	–	–	39,5	28	360	TGA2540-FL	Корпусированный чип	0,25 GaN HEMT
2	TriQuint	DC–3,5	15	–5	–5	47,2	28	200 (pulse)	T1G4005528-FS	Корпусированный чип	0,25 GaN on SiC
3	TriQuint	14–16	23	–	–	43	35	2000	TGA2572	МИС, сложение мощностей	0,25 GaN on SiC
4	Eudyna	1,2–1,4	16,3	–	–	52,3	50	1000	EGN13B200IV-R	Корпусированный транзистор	GaN HEMT
5	Eudyna	2,7–2,9	12	–	–	56	50	2000	EGN28B400M1B-R	Корпусированный транзистор	GaN HEMT
6	RFMD	DC–4	13,5	–	–	49,5	48	300	RF3933D	Монолитный транзистор	GaN on SiC
7	RFMD	1,2–1,4	15	–8	–	54	50	440	RFHA1020	Корпусированный чип	GaN
9	RFMD	2,8–3,4	12	–5,5	–	54,5	50	440	RF3928	Корпусированный чип	GaN
10	Nitronex	DC–1,5	14±1,0	–8	–15	38	28	100 (pulse)	NPA1003	Корпусированный чип	GaN HEMT
11	Nitronex	2,5–6,0	9	–	–	40	28	–	NPA1001	Корпусированный чип	GaN HEMT
12	Nitronex	DC–1,2	16	–	–	53	28	1400	NPT1007	Корпусированный транзистор	GaN HEMT
13	Cree	2,7–3,5	28±1,0	–15	–5	49	28	700	CMPA2735075F	Корпусированный чип	GaN HEMT
14	Cree	0,02–6	24	–	–	44	50	500	CMPA0060025F	Корпусированный транзистор	GaN HEMT

Как видно из табл. 2, коммерчески доступные GaN-СВЧ-транзисторы и усилители мощности в основном представлены в относительно низкочастотном диапазоне до 4–6 ГГц, при этом выходная мощность достигает 400 Вт (№5 в табл. 2). Более высокочастотные диапазоны осваиваются медленнее, коммерчески доступные решения в X-диапазоне и выше предлагает только одна фирма Triquint.

**Заключение.** Несмотря на очевидные преимущества УМ на основе широкодиапазонных материалов GaN и SiC (высокая плотность выходной мощности, простота схемотехнической реализации мощных усилителей, большая теплопроводность), данные технологии еще недостаточно развиты. Коммерчески доступные GaN-усилители и транзисторы ограничены диапазоном до 4–6 ГГц; верхняя частота исследовательских образцов достигает 90 ГГц. В то же время GaAs СВЧ МИС в диапазоне до 90 ГГц уже предлагаются на коммерческом рынке. Однако многие исследователи уверены в том, что устройства на основе GaN и SiC в скором времени вытеснят материал GaAs из области мощных усилителей, оставив ему сферу малошумящих и других маломощных устройств.

Работа выполнялась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по направлениям «Создание электронной компонентной базы» (14.740.11.1261), «Микроэлектроника» (П669, П499, 16.740.11.0092, 14.740.11.1136) и «Проведение исследований коллективами НОЦ по направлению «Микроэлектроника» (14.740.11.0135).

#### *Литература*

1. Hek A.P. de. Design, Realization and Test of GaAs-based Monolithic Integrated X-band High Power Amplifiers. – Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2002. – 322 p.
2. Quay R. Gallium Nitride Electronics. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – 471 p.
3. Кищинский А.А. Твердотельные СВЧ-усилители мощности на нитриде галлия – состояние и перспективы развития // 19-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009): матер. конф. – Севастополь: Вебер, 2009. –Т. 1. – С. 11–16.
4. March S. Practical MMIC Design. – Artech House, Inc., 2006. – 377 p.
5. Micovic M. W-band GaN MMIC with 842 mW output power / M. Micovic, A. Kurdoghlian, K. Shinohara et. al. // Microwave Symposium Digest (MTT), 2010 IEEE MTT-S International. – 23–28 May, 2010. – P. 237–239.
6. Minin I. Microwave and Millimeter Wave Technologies Modern UWB antennas and equipment // Intech. – March, 2010. – 488 p.
7. Piotrowicz S. 43W, 52% PAE X-Band AlGaN/GaN HEMTs MMIC Amplifiers / S. Piotrowicz, Z. Ouarch, E. Chartier et al. // Microwave Symposium Digest (MTT). – 2010 IEEE MTT-S International. – 23–28 May, 2010. – P. 505–508.
8. HRL Laboratories LCC [Электронный ресурс]. – <http://www.kiss.caltech.edu/workshops/mmic2008/presentations/micovic.pdf> (дата обращения: 01.09.11).

---

#### **Коколов Андрей Александрович**

Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа  
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17  
Эл. почта: kokolovaa@gmail.com

#### **Черкашин Михаил Владимирович**

Канд. техн. наук, доцент каф. КСУП ТУСУРа, декан ФВС ТУСУРа  
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17  
Эл. почта: mik\_cher@mail.ru

Kokolov A.A., Cherkashin M.V.

#### **Construction and performance of modern MMIC based on GaAs and GaN**

The article provides an overview of schemes and the characteristics of modern microwave monolithic power amplifiers (PA). The advantages of microwave transistors based on wideband semiconductor materials (silicon carbide SiC and gallium nitride GaN) are described. This review will be useful to engineers involved in the design of microwave devices.

**Keywords:** power amplifier, monolithic microwave integrated circuit, GaAs HEMT, GaN HEMT.