

СВЧ — транзисторы компании Advanced Power Technology для авионики и радаров

Юрий ШАРОПИН
yuri@icquest.ru

Целью настоящей статьи, является обзор СВЧ-транзисторов, применяемых в авиационной электронике и радиолокационных станциях. В статье рассматриваются основные особенности и параметры СВЧ-транзисторов компании Advanced Power Technology, дано краткое сравнение транзисторов с аналогами, производимыми другими фирмами.

Введение

Высокочастотное отделение компании Advanced Power Technology (APT-RF) было сформировано в 2002 году после приобретения и объединения компаний GHz Technology Inc. и Microsemi RF. Дополнив собственные разработки продуктами этих компаний, APT-RF сейчас выпускает для СВЧ как биполярные, так и полевые транзисторы по технологиям VDMOS и LDMOS. Все выпускаемые транзисторы кремниевые и охватывают диапазон частот от 1 МГц до 3,5 ГГц и диапазон напряжений от нескольких вольт до 300 В. Продукция компании соответствует международному стандарту качества ISO 9001, производится по военным стандартам и имеет космическую приемку. Производственные линии компании и линии тестирования продукции сегодня являются одними из самых современных в мире. Выпускаемая компанией продукция подразделяется на несколько категорий, соответствующих различным применениям и коммерческим нишам: радио- и телевидение, авиационная электроника, радиолокационные станции (РЛС) различных диапазонов частот, радиорелейные, широкополосные средства связи (ШПС) и др. [1].

Технологии производства СВЧ-транзисторов компании АРТ

Биполярная кремниевая технология — традиционная технология производства транзисторов, которая постоянно совершенствуется компанией АРТ. Данная технология наиболее распространена, отработана, и продукты на ее основе получаются более дешевыми. Большинство СВЧ-транзисторов компании АРТ являются биполярными.

VDMOS (Vertical Diffusion Metal Oxide Semiconductors) — двухдиффузионная технология с вертикальной МОП-структурой. Для данной технологии характерна лучшая термостабильность и плотность мощности

транзисторов, чем для биполярной. Благодаря объединению традиционной VDMOS-технологии со специфической ВЧ-технологией компании удалось расширить диапазон рабочих напряжений ВЧ-транзисторов до 300 В.

По данной технологии изготавливаются транзисторы для СВЧ-связи, промышленного, научного и медицинского применений (ISM). Они предназначены для работы в широком диапазоне частот (2–175 МГц) в непрерывном режиме и обеспечивают выходную мощность от 30 до 300 Вт.

LDMOS (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductors) — кремниевая технология МОП с боковой диффузией, обладающая наилучшими характеристиками, такими как линейность, усиление, термостабильность, устойчивость к рассогласованию, высокий КПД, запас по рассеиваемой мощности, надежность [2]. В статье «Высокочастотные полупроводниковые приборы» [3] отмечено, что LDMOS-транзисторы целесообразно применять для работы на постоянную нагрузку и в ограниченном диапазоне мощностей. По данной технологии изготавливаются мощные транзисторы для работы в авиационной электронике на частотах от 1030 до 1090 МГц, обеспечивающие мощность в нагрузке 100, 200 и 300 Вт в импульсном режиме работы.

Технологии будущего. В настоящие время компанией АРТ разрабатывается новое поколение полупроводниковых СВЧ-транзисторов, основанное на технологии, использующей полупроводниковые материалы с широкой областью запрещенной зоны: карбид кремния (SiC) и нитрид галлия (GaN). Эти транзисторы будут проектироваться в первую очередь для РЛС, ШПС и авиационной электроники.

Новое поколение транзисторов будет иметь значительные преимущества по сравнению с транзисторами, изготовленными из традиционных материалов (Si и GaAs). Они смогут обеспечить большее соотношение мощности и рабочего напряжения и более высокую плотность

мощности. Новые транзисторы позволят значительно расширить ширину импульса и ширину полосы частот, а также снизить потери, соответственно, повысить КПД и устойчивость обычных транзисторных усилителей.

Работа опытного образца на основе SiC уже была продемонстрирована в июле 2005 года [4]. Он обладал максимальным коэффициентом усиления 18 дБ на частоте 500 кГц, а на частоте 1 ГГц — 12,4 дБ.

Прототипы новых транзисторов будут доступны в 2006 году.

Особенности производства транзисторов компании АРТ

- Биполярные и полевые транзисторы (LDMOS, VDMOS) спроектированы для работы в непрерывном (НР) и импульсном режимах.
- Выводы транзисторов имеют золотое покрытие.
- Транзисторы реализованы в стандартных герметичных корпусах.
- Полностью автоматизированная сборка, обеспечивающая контроль над продукцией, и повторяемость параметров транзисторов от партии к партии.
- Предварительная подгонка для лучшей производительности во всем диапазоне рабочих частот.
- Автоматическое тестирование изделий в рабочем диапазоне и сверх него, гарантирующее рабочие характеристики.

Транзисторы для радиолокационных станций (РЛС)

Транзисторы для РЛС изготавливаются для определенных частотных диапазонов, соответствующих рабочим частотам РЛС. Рабочие диапазоны частот регламентированы американским стандартом [5], который присваивает каждому диапазону буквенное обозначение:

- UHF-диапазон: 400–450 МГц;

- Р-диапазон: 890–1000 МГц;
- L-диапазон: 1,2–2 ГГц;
- S-диапазон: 2,7–3,1 ГГц и 3,1–3,4 ГГц.

Все транзисторы для РЛС изготовлены на основе кремния по биполярной технологии, но в ближайшем будущем копания АРТ планирует выпустить транзисторы, основанные на карбиде кремния (SiC) и нитриде галлия (GaN). Все транзисторы рассчитаны на работу в классе усиления «С».

Для **УНФ-диапазона** выпускаются две модели транзисторов MS2176 и MS2200, рассчитанные на минимальную гарантированную выходную мощность 400 и 500 Вт. Эти транзисторы имеют коэффициент усиления по мощности 9,6 дБ, рабочее напряжение 40 В и спроектированы для работы в импульсном режиме в схеме с общим эмиттером (СОЭ). При коэффициенте заполнения 10% и ширине импульса 250 мкс КПД транзисторов составляет 50%. Транзисторы устойчиво работают при рассогласовании с нагрузкой, определяемой коэффициентом стоячей волны (КСВ) 20:1.

Для работы РЛС в **Р-диапазоне** частот компаний АРТ выпускается три разновидности транзисторов: 0910-60М, 0910-150М и 0910-300М — на различные уровни мощности 60, 150 и 300 Вт соответственно.

Эти транзисторы спроектированы для работы с СВЧ-импульсами средней длительности (150 мс) и минимальным коэффициентом заполнения 5%. Например, высокоэффективный 300-ваттный транзистор при усилении в классе С в схеме с общей базой (СОБ) обеспечивает уникальные технические характеристики: коэффициент усиления по мощности 9,6 дБ, КПД коллекторной цепи 50% и чрезвычайно низкий спад импульса 0,5 дБ или менее при длительности импульса 150 мс. Эти характеристики достигнуты благодаря использованию самой последней технологии изготовления кремниевых плоскостных мощных транзисторов.

Самой большой группой транзисторов для РЛС являются транзисторы **L-диапазона**. Транзисторы диапазона частот 1200–1400 МГц, выпускаются различной мощности от 2 до 370 Вт. Маломощные транзисторы (2, 6, 12 Вт) предназначены для работы в непрерывном режиме. Транзисторы средней мощности (30–140 Вт) могут работать с длительностью модулирующего импульса до 5000 мкс при коэффициенте заполнения 20%, а транзисторы большой мощности (220–370 Вт) — с длительностью импульса от 100 до 330 мкс при коэффициенте заполнения 10%. Для работы в более высоком L-диапазоне частот 1480–1650 МГц выпускаются три транзистора, рассчитанные на различные уровни мощности: 20, 110 и 250 Вт. Мощные транзисторы имеют достаточно маленькое температурное сопротивление кристалл-корпус от 0,5 до 0,1 °С/Вт.

Транзисторы **S-диапазона** составляют группу из пяти приборов. Для диапазона частот 2700–3100 МГц выпускаются четыре транзистора мощностью 100–170 Вт, а для диапазо-

Таблица 1. Транзисторы для радиолокационных станций

	Рвых min, Вт	Рвых min, Вт	Ку min, дБ	Ucc, В	КПД, %	Длит. имп., мкс	Кэф. заполн., %	КСВН	Tjс, °С/Вт	Тип корпуса	Наимено- вание
УНФ	300	33	9,6	40	50	250	10	20:1	0,20	M106	M 32176
400–450 МГц, Класс С, СОЭ	500	54	9,7	40	50	250	10	20:1	0,15	M102	M 32200
Р-диапазон	60	95	8,0	40	40	150	5	3:1	1,0	55AW-1	0910-60М
890–1000 МГц, Класс С, СОБ	300	33	9,6	50	40	150	5	3:1	0,22	55КТ-1	0910-300М
L-диапазон	2	0,35	7,5	28	45	HP	100	10:1	14	55LT	1014-2
1200–1400 МГц, Класс С, СОБ	370	50	8,7	50	50	330	10	2:1	0,29	55ST-1	1214-370М
L-диапазон	20	3,5	8,0	36	40	200	10	3:1	1,0	55LV	1517-20М
1480–1650 МГц, Класс С, СОБ	250	50	7,0	40	40	200	10	3:1	0,25	55ST-1	1517-250М
S-диапазон	100	16	8,0	36	40	200	10	2:1	0,30	55KS-1	2731-100М
2700–3100 МГц, Класс С, СОБ	170	24	8,5	36	50	100	10	2:1	0,30	55KS-1	2729-170
S-диапазон	65	11,5	7,5	36	40	120	10	2:1	0,50	55KS-1	3134-65М
3100–3400 МГц, Класс С, СОБ											

на частот 3100–3400 МГц — один транзистор мощностью 65 Вт. Они спроектированы для работы в схеме с общей базой в классе С.

Все транзисторы S- и L-диапазонов имеют коэффициент усиления от 7 до 8,7 дБ. Основные модели транзисторов для РЛС сведены в таблицу 1.

Транзисторы для авиационной электроники

Все транзисторы, разработанные для авиационной электроники, нацелены на конкретные применения:

- Дальномерное оборудование (distance measuring equipment — DME), диапазон частот 960–1215 МГц;
- Системы опознавания «свой — чужой» (identification friend or foe — IFF);
- Системы распределения общей тактической информации (Joint Tactical Information Distribution System — JTIDS), диапазон частот 960–1215 МГц;
- Радионавигационная система ближнего действия (tactical air navigation system — TACAN), диапазон частот 960–1215 МГц;
- Системы предотвращения столкновений воздушных судов, системы диспетчеризации (traffic collision avoidance systems — TCAS), частоты 1030 и 1090 МГц;
- Авиационные РЛС опроса самолетов с выборочным и адресным опросом (MODE-S). Такой режим улучшает качество обнаружения. Недавно был введен Европейской организацией безопасности авиационной навигации.
- Ответчики (Transponder), и опросные устройства (Interrogator), частоты 1030 и 1090 МГц;

Для каждого отдельного применения транзисторы выпускаются на различную мощность от самой минимальной (единицы ватт) до максимальной (сотни ватт). Мощные транзисторы выгоднее применять там, где необходимы минимальные размеры и вес, заменяя одним транзисторным каскадом несколько маломощных каскадов.

Все транзисторы тестированы на весь заявленный диапазон частот и заявленные условия работы для полной уверенности в их работоспособности в конечном устройстве

пользователя и для минимизации настройки на заводе-изготовителе.

Для авиационной электроники выпускаются транзисторы по двум технологиям: стандартной биполярной и LDMOS.

Большой группой транзисторов (15 приборов) для авионики являются транзисторы диапазона частот 1090 МГц. Три из них маломощные (MS2290, MS2203, MS2204), предназначены для непрерывной работы (НР) в классе А в схеме с общим эмиттером, при этом их коэффициент усиления составляет 10–10,90 дБ. Напряжение питания этих транзисторов 18 В. Другие 12 приборов предназначены для работы в импульсном режиме в классе С, в схеме с общей базой. Они изготавливаются на уровень выходной мощности от 2 до 1000 Вт. Самые мощные транзисторы имеют температурный коэффициент сопротивления от 0,10 до 0,06 °С/Вт. Коэффициент усиления составляет для маломощных 10 дБ, для мощных транзисторов 6,80 дБ. Напряжение питания большинства транзисторов 50 В. Длительность входного импульса для всех транзисторов составляет 10 мкс при коэффициенте заполнения 1%.

Другой большой группой (26 приборов) является аналогичная группа транзисторов другого частотного диапазона 1025–1150 МГц для применения в бортовых системах измерения дальности. Один из этих транзисторов (1000MP) предназначен для непрерывной работы и обеспечивает мощность в нагрузке 0,6 Вт. Остальные рассчитаны на импульсный режим работы (параметры некоторых из них приведены в таблице 2).

Помимо приборов для авионики и радаров, АРТ производит СВЧ-транзисторы и для других приложений. Большая группа транзисторов (порядка 100) выпускается для СВЧ-средств связи различных диапазонов частот. Также выпускаются СВЧ-транзисторы для радио- и телевещания, для радиорелейных систем, для широкополосных средств связи, и, естественно, есть группа маломощных транзисторов общего назначения. Отдельного внимания заслуживают следующие две группы: транзисторы, предназначенные для линейного режима работы в классе усиления «А» на частотах от 1 МГц до 2,3 ГГц, и высо-

Таблица 2. Транзисторы для авионики											
	Р _{вых} min, Вт	Р _{вых} min, Вт	К _υ min, дБ	Усг, В	КПД, %	Длит. имп., мкс	Кэф. заполн., %	КСВН	Т _ж , °С/Вт	Тип корпуса	Наимено- вание
Transponder/Interrogator, 1030/1090 МГц, Класс С, СОБ	150	25	7,80	50	40	10	1	30:1	0,30	MBS	MS2393
	400	75	7,30	50	40	10	1	20:1	0,20	55СТ- 1	TPR400
LDMOS: Transponder/Interrogator, 1030/1090 МГц, Класс АВ, СОИ	110	5,5	13,0	32	50	32	2	3:1	0,38	55QZ	1011LDHO
	300	15	13,0	32	50	32	2	3:1	0,13	55QM	1011LD300
Transponder/1090 МГц, Класс А, СОЭ	0,20	0,02	10,00	18	—	НР	—	30:1	25,0	M115	MS2290
	0,60	0,05	10,90	18	—	НР	—	30:1	25,0	M115	MS2204
Transponder/1090 МГц, Класс С, СОБ	2	0,25	9,00	28	35	10	1	—	10	M220	MS2201
	1000	208	8,00	50	43	10	1	9:1	0,06	55KT-1	TPR1000
Interrogator/1030 МГц, Класс С, СОБ	1000	158	8,00	50	45	1	1	4:1	0,08	55SW-1	ITC1000
	1000	100	10,00	50	50	1	1	4:1	0,08	55SW-1	ITC1100
TCAS 1090 МГц, Класс С, СОБ	400	63	8,00	50	45	32	2	15:1	0,17	M216	MS2207
	450	100	6,50	45	35	32	2	10:1	0,06	55KT- 1	TCS450
TCAS 1030 МГц, Класс С, СОБ	1200	150	9,00	50	45	32	2	4:1	0,02	55TU-1	TCS1200
	400	90	6,50	45	35	32	1	10:1	0,15	55KT- 1	MDS400
MODES, 1030/1090 МГц, СОБ	1100	115	9,40	50	40	128	2	4:1	0,02	55TU-1	MDS1100

ковольтные транзисторы для промышлен-
ных, научных, медицинских применений
и высокочастотных коммуникаций. Это не-
большая группа мощных полевых ВЧ-тран-
зисторов (30–130 МГц, 85–750 Вт) с рабочим
напряжением на стоке от 50 до 300 В.

Сравнение транзисторов
АРТ и Philips

В заключение сравним транзисторы фирмы
АРТ с другими транзисторами, имеющимися
на нашем рынке. Для сравнения выберем фир-
му Philips Semiconductors, являющуюся лиде-
ром в разработке и производстве СВЧ-транзи-
сторов по технологии LDMOS [2, 6].

Транзисторы для РЛС. Для L-диапазона
Philips выпускает только два транзистора
мощностью 25 и 250 Вт, тогда как компания
АРТ — 14 приборов различного назначения.

Для S-диапазона Philips выпускает не-
сколько большее число транзисторов — 8,
но мощностью не боле 110 Вт (у АРТ верх-
няя модель транзистора рассчитана на мощ-
ность 175 Вт).

Транзисторы для авионики. Компания
Philips выпускает всего 10 видов транзисто-
ров для авионики, из них 5 — по технологии
LDMOS, другие 5 — по биполярной техноло-
гии [7]. Диапазон мощностей транзисторов
компании Philips — от 2 до 375 Вт. Осталь-
ные параметры транзисторов схожи. Компа-
ния АРТ выпускает 82 модели транзисторов
для авионики, из которых 19 рассчитаны
на мощности более 400 Вт.

Заключение

Хотя Philips и является «законодателем
мод» в технологии LDMOS-транзисторов,

компания АРТ сумела выпустить на рынок
значительно большее число биполярных
и LDMOS-транзисторов для различных при-
менений, в том числе и с уникальными па-
раметрами, не имеющих аналогов у других
фирм-разработчиков. Так, СВЧ-транзисто-
ры, рассчитанные на выходную мощность
более 500 Вт компания Philips не произво-
дит в принципе, а для компании АРТ этот
уровень мощности — не предел. Компания
АРТ постоянно совершенствует свою техно-
логию производства СВЧ-транзисторов
и разрабатывает новые технологии. Резуль-
татов этих разработок можно ожидать уже
этом новом году.

Литература

1. Каталог СВЧ-транзисторов компании АРТ.
www.advancedpower.com

2. Захаров В. Мощные СВЧ-транзисторы Philips
Semiconductors. — 01.09.2004
[http://www.radioradar.net/spravka/
philips_svch_power.php](http://www.radioradar.net/spravka/philips_svch_power.php).

3. Майская В. Высокочастотные полупроводнико-
вые приборы // Электроника НТБ. 2004. № 8.

4. Feng Zhao, Ivan Perez-Wurfl, Chih-Fang Huang, John
Torvik, Bart Van Zeghbroeck. First Demonstration
Of 4H-SiC RF Bipolar Junction Transistors On
A Semi-insulating Substrate With fT/fMAX Of
7/5.2 GHz. IEEE MTT-S 2005 International Microwave
Symposium.

5. IEEE Standard for Letter Designations for Radar-
Frequency Bands. The Institute of Electrical and
Electronic Engineers, Inc. New York. January 8, 2003.

6. Дидилев Ст. Мощные LDMOS-транзисторы: пре-
имущества и области применения // Компонен-
ты и технологии. 2002. № 2.

7. <http://www.semiconductors.philips.com>