

# СОВРЕМЕННЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СВЧ-МОДУЛИ

## НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ КОМПАНИИ "МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ"

С.Гармаш, А.Кищинский, Е.Маркинов, А.Радченко, Д.Суханов,  
mwsystems@mwsystems.ru

В 2014 году исполнилось десять лет компании "Микроволновые системы". Основное направление ее деятельности – разработка интегральных модулей СВЧ-диапазона, в первую очередь, транзисторных усилителей мощности. За минувшие годы компании удалось создать эффективное производство широкополосных твердотельных СВЧ-усилителей, которые отличаются привлекательным соотношением цена/качество и по своим параметрам не уступают мировым аналогам. На основе применения новых компонентов, материалов, конструкторских решений и технологий компания добилась серьезных успехов в разработке широкого спектра СВЧ-изделий. Несомненный интерес представляют ее новые разработки, в частности, модули широкополосных транзисторных усилителей мощности, а также перспективные многофункциональные СВЧ-модули. О некоторых из этих устройств и пойдет речь в статье.

### НОВЫЙ ЛИТЕРНЫЙ РЯД СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СВЧ-УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

Разработка и производство широкополосных транзисторных усилителей СВЧ-мощности в сантиметровом диапазоне длин волн – ключевое направление деятельности компании "Микроволновые системы". Одной из последних разработок в этом направлении является литерный ряд усилителей средней мощности непрерывного режима с мультиоктавными полосами рабочих частот (рис.1, табл.1). Усилители, работающие в диапазонах 1...4 ГГц, 1...6 ГГц, 2...8 ГГц, 4...12 ГГц и 8...18 ГГц, построены на основе современных нитрид-галлиевых (GaN) и арсенид-галлиевых (GaAs) транзисторов и монолитных интегральных схем.

Ключевые особенности новых усилителей:

- мгновенная полоса частот 1,25–2,5 октавы;
- цифровое 5-разрядное управление усилением;
- встроенные узлы, расширяющие функциональные возможности усилителей и обеспечивающие контроль работы и управление характеристиками

прибора, в том числе детекторы контроля выходной мощности, скоростные модуляторы питания, датчики температуры;

- температурная стабилизация усиления;
- устройства синхронизации питания;
- нормированные ФЧХ, позволяющие применять приборы данного ряда в многолучевых антенных системах со сканированием луча;
- тонкопленочная технология гибридных интегральных схем (ГИС) и монолитных интегральных схем (МИС);
- наличие миниатюрных разъемов питания и управления, исключающих необходимость пайки при монтаже в аппаратуру.

В конструкции усилителей данного ряда реализованы технические решения, которые обеспечивают устройствам высокую надежность. Корпус усилителя изготовлен из алюминиевого сплава, СВЧ-тракт расположен в гермообъеме, который заполнен инертным газом под избыточным давлением. Внутренний объем корпуса сконструирован так, чтобы устранить

возможность обратной связи по электромагнитному полю в СВЧ-тракте. Для уменьшения внутреннего объема корпуса и создания в нем заперделного волновода на рабочих частотах корпус разделен на отсеки, а кроме того, используются экранирующие крышки и металлические вкладыши.

СВЧ-тракт усилителей содержит предварительные каскады, узлы аналогового и цифрового управления амплитудой, транзисторные выходные каскады, схемы суммирования мощности и встроенный детектор контроля выходной мощности. СВЧ-узлы созданы на основе гибридно-интегральной и квазимонолитной технологии.

В усилителях используется комбинированный низкочастотный разъем для цепей питания и управления, который содержит сигнальные и силовые контакты в едином конструктиве. С обратной стороны корпуса усилителя расположены печатные платы блоков управления и синхронизации питания, которые залиты компаундом для обеспечения защиты от повышенной влажности. В ряде случаев применяют многослойные и двухуровневые платы для уменьшения занимаемого объема. Для соединения узлов

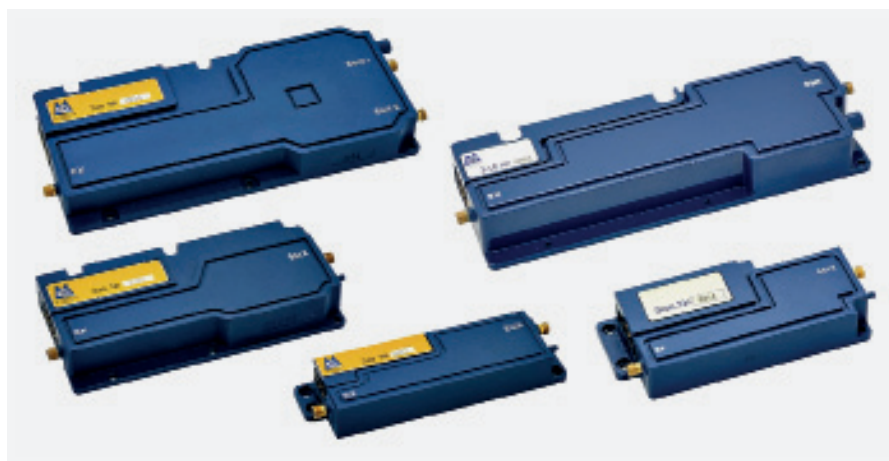


Рис.1. Сверхширокополосные СВЧ-усилители мощности

применяются удобные для монтажа гибкие полиимидные шлейфы.

Сверхширокополосные усилительные элементы выходных каскадов построены по балансной схеме реактивно-диссипативного согласования на двух дискретных бескорпусных транзисторах. Выходная мощность одного элемента (балансного каскада) составляет от 2,5 до 4 Вт при применении арсенид-галлиевых (GaAs) транзисторов и от 10 до 15 Вт и более при использовании нитрид-галлиевых (GaN) транзисторов. В выходных элементах цепей согласования широко применяется технология пассивных интегральных схем на арсениде галлия [1].

Таблица 1. Электрические характеристики широкополосных СВЧ-усилителей мощности при температуре 25°C

Характеристика	СВЧ-усилители мощности				
	Литера 1	Литера 2	Литера 3	Литера 4	Литера 5
Рабочий диапазон частот, ГГц	1...4	4...12	8...18	1...6	2...8
Выходная мощность, Вт	>13 (×2 выхода)	>18 (6...12 ГГц) >22 (4...6 ГГц)	>5	>30	>15
Коэффициент усиления в линейном режиме, дБ	49...51	47...50	39...48	55...58	50...53
КСВН входа/выхода	<2,0/2,5				
Ток потребления по цепи +27 В, А	<4,3	<3,4	-	<6,7	<2,4
Ток потребления по цепи +9 В, А	<0,7	<3,9	<6	<0,7	<0,6
Ток потребления по цепи -9 В, А	<0,2	<0,15	<0,1	<0,1	<0,1
Коэффициент полезного действия, %	-	>25 (4...7 ГГц) >15 (7...12 ГГц)	> 12	18...27	27...40
Габаритные размеры, мм	84×187×22	65×145×21	35×129×21	180×60×22,5	124×50×21
Масса, г	560	<320	< 200	<430	<240

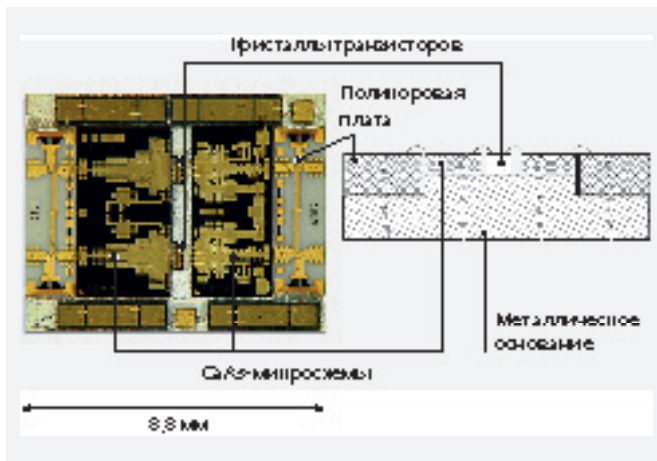


Рис.2. Конструкция выходного усилительного элемента для диапазона частот 8...18 ГГц

Выходной балансный каскад Ки-диапазона (входит в состав усилителя литеры З) содержит интегральные микросхемы на GaAs с пассивными элементами (интегральными конденсаторами, резисторами, распределенными элементами) и кристаллы дискретных транзисторов (рис.2). Кристаллы микросхем и транзисторов, а также поликорвые платы с расположенными на них цепями деления-суммирования мощности установлены на металлическое основание.

В конструкции выходных элементов, построенных на GaN-транзисторах, для обеспечения приемлемого теплового режима кристалла применяют специальные технические решения, в том числе распределители тепла из меди или металлизированного поликристаллического алмаза и электропроводящие клеи с теплопроводностью не менее 60 Вт/м·К. Проблемы избыточного тепла вызваны высокой плотностью тепловой мощности (10–15 Вт/мм<sup>2</sup>), генерируемой GaN-транзисторами в непрерывном режиме при невысоком (из-за широкой полосы частот) минимальном КПД или при работе на рассогласованную нагрузку.

Повышение уровня выходной мощности достигается с помощью схем бинарного или трехканального суммирования на основе сверхширокополосных квадратурных мостов различных конструкций [2]. Применение достаточно сложных квадратурных схем вызвано необходимостью достижения сверхширокой полосы частот, в которой такие сумматоры способны обеспечить эффективное подавление отраженных волн, низкие значения КСВН входа и выхода приборов, а также малые габариты устройства. Однако следует отметить, что широкая полоса частот в данном случае достигается за счет относительно низкой величины КПД, высокой сложности и, соответственно, стоимости этих устройств.

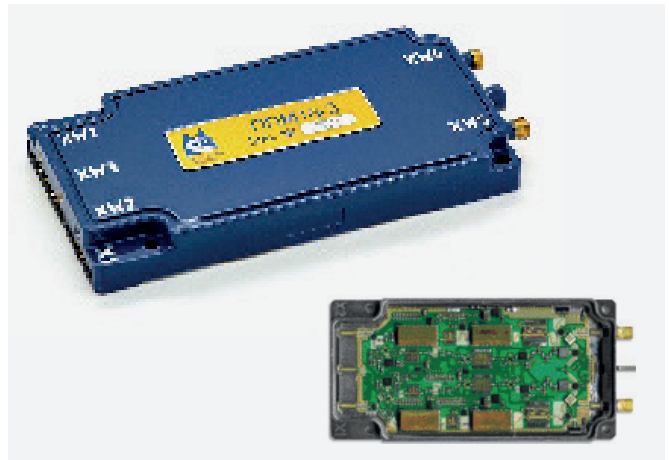


Рис.3. Приемопередающий модуль (внизу справа – со снятой крышкой)

### СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИЕ МОДУЛИ С НЕСУЩИМИ ПЕЧАТНЫМИ ПЛАТАМИ

Наряду с "классическими" усилителями мощности, выполненными по тонкопленочной гибридно-интегральной технологии, компания "Микроволновые системы" разрабатывает для нужд конкретных заказчиков малогабаритные многоканальные сверхширокополосные приемопередающие модули (ППМ) или усилительные модули непрерывного режима. В качестве подложки-носителя в них используется многослойная печатная плата, на которой размещены активные элементы в корпусах для поверхностного монтажа.

Примером такого типа изделий может служить приемопередающий модуль диапазона 1...6 ГГц (рис.3), который содержит по два идентичных усилительных передающих и приемных канала.

Основные электрические характеристики ППМ диапазона 1...6 ГГц:

- диапазон рабочих частот: 1...6 ГГц;
- выходная непрерывная мощность передающего канала: 2...4,5 Вт;
- коэффициент усиления передающего канала: 43...46 дБ;
- неидентичность фазочастотных характеристик: 20 град.;
- коэффициент усиления приемного канала: 26...29 дБ;
- динамический диапазон приемного канала: 56 дБ;
- время переключения между режимами "прием" и "передача": 150 нс;
- КПД: 10–20%;
- габаритные размеры: 123 × 59 × 15 мм;
- масса: 190 г.

Каждый передающий канал модуля имеет дискретный аттенюатор с диапазоном регулировки 0...30 дБ

Таблица 2. Характеристики интегральных усилителей в SMD-корпусе

Характеристика	Тип усилителя			
	ИУ-1А	ИУ-1Б	ИУ-2А	ИУ-2Б
Диапазон рабочих частот, ГГц	0,8...6		6...18	
Коэффициент усиления в линейном режиме, дБ	18...25	10...15	18...25	10...15
Частотная неравномерность АЧХ в линейном режиме, дБ	<2	<2	<3	<3
Выходная мощность (не менее), Вт	>0,2	>2	>0,2	>2
КПД по добавляемой мощности, не менее, %	15	20	15	20
КСВН входа и выхода	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5
Напряжения питания, В: положительной полярности отрицательной полярности	+8 -5	+24 -5	+8 -5	+8 -5
Предельно-допустимая входная непрерывная мощность, мВт	50	500	50	500
Неидентичность фазочастотных характеристик от образца к образцу, град.	<20			
Габаритные размеры, мм	16,5×8,2×3,5			
Масса усилителя, г (не более)	3			

с шагом 1 дБ, схему температурной стабилизации усиления, схему скоростной модуляции питания, направленный детектор выходной мощности, выходной переключатель и встроенную согласованную нагрузку. Выходной усилитель передающего канала представляет собой усилитель бегущей волны, выполненный на нитрид-галлиевых транзисторных структурах. Каждый приемный канал имеет дополнительный переключатель "антенна/тест-сигнал", ограничитель входного СВЧ-сигнала, фильтры верхних и нижних частот, дискретный аттенуатор адаптации с диапазоном регулировки 0...20 дБ, схему скоростной модуляции питания и направленный детектор выходной мощности.

### ГИБРИДНО-МОНОЛИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ В МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСАХ

Сегодня одна из задач компании "Микроволновые системы" – поиск технических решений, направленных на миниатюризацию и снижение себестоимости разрабатываемых приборов. Для освоения этого направления в 2013–2015 годах конструкторами предприятия совместно со специалистами компании Kuosega был разработан и освоен в производстве ряд типов герметичных металлокерамических корпусов для фланцевого и поверхностного монтажа на печатные платы СВЧ-модулей с рабочими частотами до 25 ГГц.

Оценить эффективность применения такого типа корпусов для снижения массо-габаритных показателей аппаратуры можно, если сравнить размеры "классического" усилительного модуля РМ618–1 и усилителя УР-2 в герметичном фланцевом корпусе (рис.4). Диапазон рабочих частот модуля РМ618–1 составляет 6...18 ГГц, выходная мощность 1,2 Вт, габаритные размеры 83×38×18 мм, масса 100 г. Усилитель УР-2 работает в диапазоне частот 5...18 ГГц, его выходная мощность составляет более 1,3 Вт, габариты – 34×8,4×3,5 мм, масса – не более 6 г.

В корпусах для фланцевого монтажа разработаны и поставляются две модели усилителей – УР-1 и УР-2. Первый усилитель работает в диапазоне частот



Рис. 4. Сравнительные размеры модуля РМ618-1 и усилителя УР-2

0,8...6 ГГц, второй – 5...18 ГГц. Выходная мощность УР-1 составляет от 3,6 до 6,1 Вт при входной мощности 4 мВт, а выходная мощность усилителя УР-2 – от 1,3 до 2,3 Вт при компрессии коэффициента усиления 2 дБ. Напряжения питания усилителя УР-1: +27 В, +9 В и –5 В, а усилителя УР-2: +8,2 В и –5 В. КПД каждого усилителя составляет 18–20%.

Усилитель УР-2 состоит из входных усилительных каскадов на основе двух арсенид-галлиевых интегральных схем (построенных по схеме распределенного усиления), фазового корректора, монолитного усилителя средней мощности и выходного каскада (рис. 5). Выходной каскад содержит гибридно-монолитный балансный каскад с согласующими цепями на основе

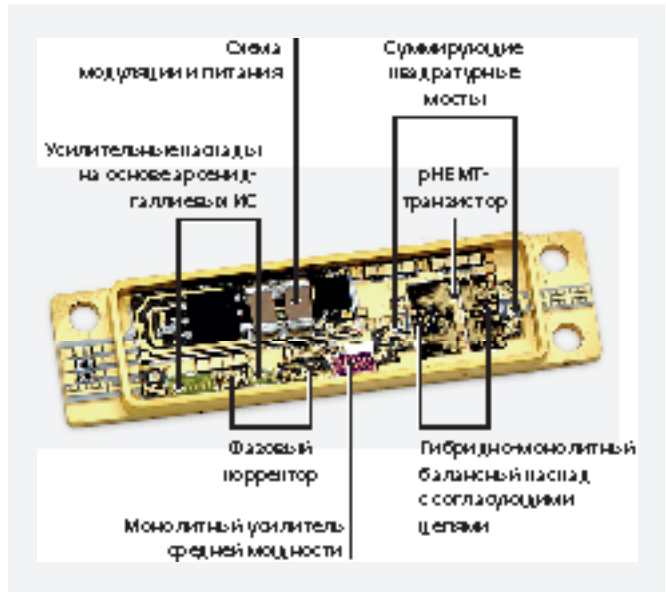


Рис. 5. Конструкция усилителя УР-2

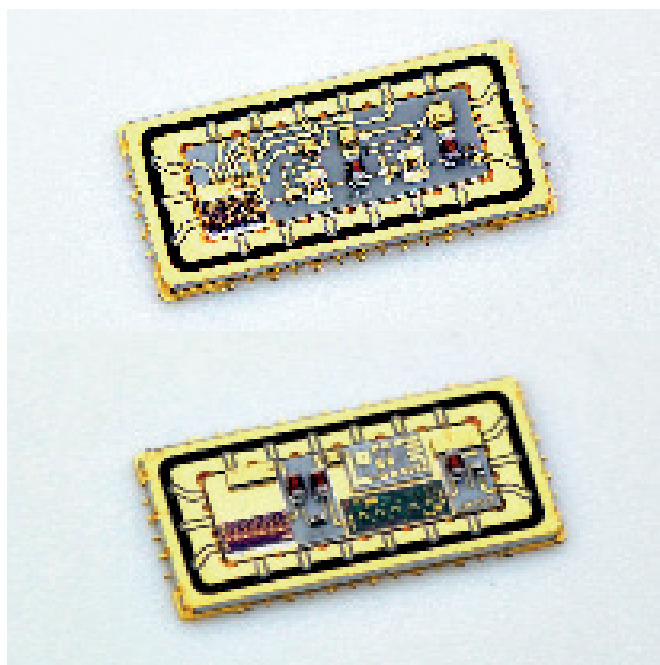
полуизолирующей GaAs-подложки толщиной 100 мкм и суммирующие квадратурные мосты, также изготовленные на GaAs-подложке. В качестве активных элементов используются два pHEMT-транзистора, ширина их затворов 1600 мкм. Управление усилителя осуществляется с помощью схемы модуляции и питания.

Кроме того, разработан ряд усилительных интегральных схем в герметичных металлокерамических SMD-корпусах с высокой теплопроводностью, которые предназначены для установки на многослойные печатные платы методом поверхностного монтажа

Таблица 3. Характеристики интегральных усилителей С- и Х-диапазонов

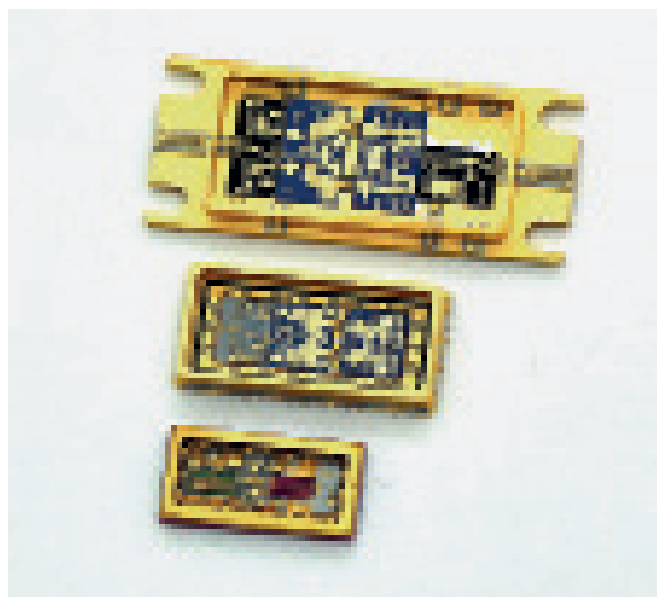
Характеристики	Тип усилителя		
	М02	М03	М04
Диапазон рабочих частот, ГГц	С/Х (перекрытие по частоте более 3:1)		
Коэффициент усиления в линейном режиме, дБ	23...26	8...10	8,5...10
Частотная неравномерность АЧХ в линейном режиме, дБ	<2	<2	<1,5
Выходная мощность (не менее), Вт	>0,3	>1,5	>6
КПД по добавляемой мощности, не менее, %	15	25	20
КСВН входа и выхода	<2	<2	<2
Напряжения питания, В: положительной полярности отрицательной полярности	+8 -7	+8 -7	+20 -7
Габаритные размеры, мм	12×6×1,75	16,5×8,2×2,25	26×10,8×2,5
Масса усилителя, г (не более)	3		





**Рис.6.** Микросхемы СВЧ-усилителей в корпусе для SMD-монтажа

с использованием стандартного оборудования (рис.6, табл.2). Размеры такого корпуса составляют всего 16,5×8,2×3,5 мм при массе не более 3 г. SMD-корпус, выполненный по технологии компании Kyocera, обеспечивает функционирование смонтированных узлов вплоть до рабочей частоты 26 ГГц. Особенностью



**Рис.7.** Гибридно-монокристалльные усилители в металлокерамических корпусах M02D, M03D и M04D

конструкции корпуса является наличие интегрированного теплоотвода, выполненного из сплошного металла (сплав медь-молибден) и впаянного в керамическую рамку с выводами – СВЧ-гермопереходами.

В 2015 году линейка гибридно-монокристалльных усилителей в металлокерамических корпусах была дополнена тремя моделями, работающими в популярных в отрасли С- и Х-диапазонах, с выходной мощностью

**Таблица 4.** Характеристики интегральных модулей с повышенным КПД

Характеристика	Тип модуля			
	M12-20	M12-50	M24-20	M24-50
Диапазон рабочих частот, ГГц	1...2	1...2	2...4	2...4
Коэффициент усиления в линейном режиме, дБ	44...46	43...45	42...44	40...43
Выходная мощность, Вт	23...25	50...58	24...27	47...51
КПД, %	41...44	34...42	35...43	37...43
Относительный уровень второй гармоники в спектре выходного сигнала, дБ	-16...-25	-10...-25	-17...-40	-21...-35
Относительный уровень третьей гармоники в спектре выходного сигнала, дБ	-16...-40	-15...-30	-18...-55	-17...-25
Напряжения питания / ток потребления, В/А: положительной полярности отрицательной полярности	+27/2,3 -6/0,05	+27/6 -6/0,05	+27/2,7 -6/0,05	+27/5 -6/0,05
Габаритный размер, мм (не более)	78,5×31,4×8	88,5×31,4×8	78,5×31,4×8	78,5×31,4×8
Масса, г (не более)	70	80	70	70

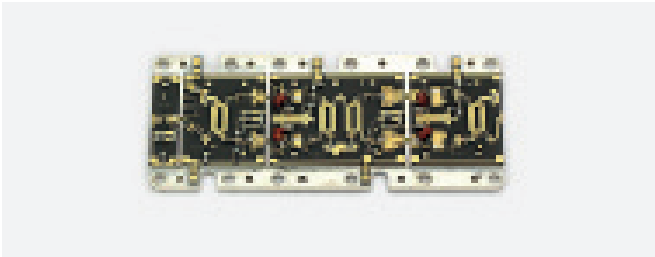


Рис.8. Типовая конструкция унифицированного интегрального модуля (M12-20)

от 0,5 до 6 Вт (рис.7, табл.3). Самый миниатюрный вариант корпуса для этих усилителей разработан специалистами Томилинского электронного завода, два других изготавливаются в компании Куосега.

Освоение производства описанных интегральных схем и усилительных модулей на их основе планируется завершить в 2016 году.

### ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ГИБРИДНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ НЕПРЕРЫВНОГО РЕЖИМА С ПОВЫШЕННЫМ КПД

Особое внимание при создании новых СВЧ-приборов компания "Микроволновые системы" уделяет работам по повышению КПД. В 2014 и 2015 годах специалистами предприятия разработаны и осваиваются в производстве унифицированные интегральные усилительные модули с уникальными (для модулей с октавной полосой частот и непрерывным режимом работы) характеристиками энергопотребления (рис.8, табл.4). Они предназначены для эксплуатации в условиях ограниченного энергопотребления, например на борту автономных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), и в составе более мощных усилительных устройств

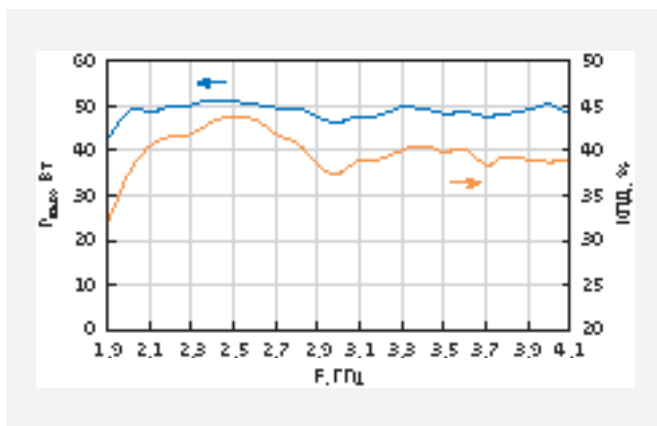


Рис.9. Выходная мощность и КПД модуля M24-50 в диапазоне рабочих частот

с выходными мощностями 200–300 Вт и выше в непрерывном режиме.

Модули этого типа разработаны по трехкаскадной схеме на бескорпусных GaN НЕМТ-транзисторах. Входной усилительный каскад построен по схеме с обратной связью. Предвыходной и выходной усилительные каскады созданы на основе балансной схемы. В балансных каскадах используются квадратурные сумматоры-делители "свернутого" типа [2]. Для более эффективного отвода тепла транзисторы установлены на пьедесталах медного основания, а керамические платы – на промежуточные пластины из псевдосплава МД-40 (на рисунке не видны), которые, в свою очередь, закреплены на медном основании.

Новые унифицированные модули с октавной полосой частот, построенные на GaN-транзисторах, демонстрируют практически вдвое более высокий КПД (рис.9) при той же выходной мощности, что и октавные усилители на GaAs-транзисторах (типа PM12-C8, PM24-C8).

Для применения в аппаратуре, размещаемой на БПЛА, на основе унифицированных модулей разработан литерный ряд усилителей (рис.10) со встроенным преобразователем вторичного питания и радиатором. Такие модули предназначены для работы в потоке воздуха (скорость потока не менее 40 м/с) и имеют небольшую массу.

\*\*\*

В статье описана лишь часть новых разработок компании "Микроволновые системы". На предприятии ведутся работы по созданию многорежимных (длительность импульса от 0,1 до 42000 мкс, скважность от 2 до 64000) импульсных усилителей мощности для радиолокации (с уровнем выходной мощности до 400 Вт

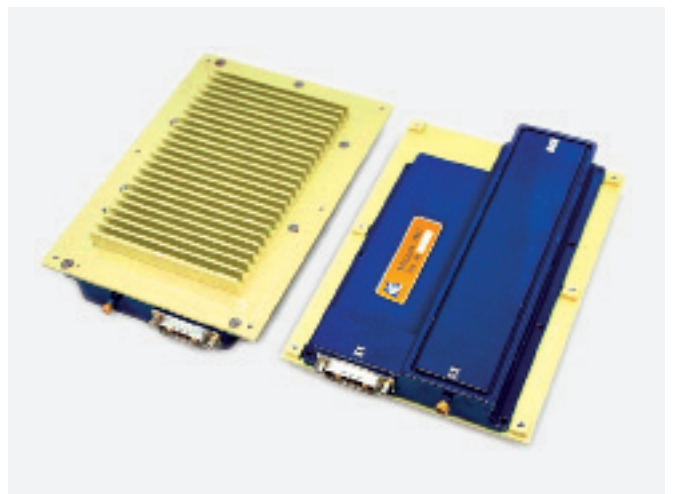


Рис.10. Модуль с радиатором воздушного охлаждения

в X-диапазоне), широкополосных импульсных усилителей X-диапазона с малым уровнем вносимых фазовых и амплитудных флуктуаций вблизи несущей, приемопередающих модулей L-диапазона с выходной импульсной мощностью до 1 кВт, высоколинейных маломощных широкополосных усилителей, усилителей непрерывного режима мощностью до 200–300 Вт с октавной полосой частот и коммутируемой фильтрацией гармоник, кристаллов GaAs-транзисторов и монолитно-интегральных схем, а также ряда других изделий. В следующих статьях мы расскажем читателям об этих разработках.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Гармаш С., Кищинский А., Лапин В., Рогожникова М.** Применение технологии пассивных интегральных схем на арсениде галлия в изготовлении широкополосных усилителей мощности СВЧ // Материалы 9-й Международной Крымской микроволновой конференции. – КрыМиКо, 1999. С. 5–8.
2. **Кищинский А., Радченко В., Радченко А.** Широкополосные квадратурные делители/сумматоры для применения в усилителях СВЧ-мощности // Материалы 23-й Международной Крымской конференции. – КрыМиКо, 2013. Т. 1. С. 6–10.

## ИМЕС намерен совершенствовать GaN-технологию

ИМЕС (Микро- и наноэлектронный научный центр в Лёвене, Бельгия) расширяет НИР по формированию эпитаксиальных структур нитрида галлия на подложках кремния (GaN-on-Si) диаметром 200 мм и созданию приборов, работающих в режиме обогащения. Цель программы НИР, начатой в июле 2009 года, – разработка процесса создания GaN-on-Si и решение задачи промышленного освоения GaN-технологии. НИР предусматривают исследования новых подложек, не влияющих на качество эпитаксиальных пленок, новых методов изоляции, которые позволят повысить степень интеграции, и создание перспективных вертикальных приборов. Сегодня портфель GaN-технологии выращивания качественных GaN-пленок на кремниевой подложке предусматривает применение трех типов буферов:

- оптимизированных для получения высокого пробивного напряжения и низкого захвата носителей (рассеяния тока);
- ступенчатого AlGaIn-буферного слоя со структурой сверхрешетки;

- буфера, образованного низкотемпературными AlN-слоями.
- К настоящему времени специалистами центра исследованы мощные работающие в режиме обогащения транзисторы с высокой подвижностью электронов со структурой металл-изолятор-полупроводник (MISHEMT) и р-канальные HEMT, а также мощный диод Шоттки с малыми значениями обратного тока и напряжения включения. Пороговое напряжение последнего поколения мощных транзисторов, работающих в режиме обогащения, превышает 2 В, сопротивление в открытом состоянии – менее 10 Ом и выходной ток – больше 450 мА/мм.

Дальнейшие работы по GaN-программы направлены на улучшение рабочих характеристик и надежности мощных транзисторов, а также на развитие технологии используемых подложек, увеличение степени интеграции и исследование новых архитектур приборов.

[www.electronics-eetimes.com](http://www.electronics-eetimes.com)