

# ШИРОКОПОЛОСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА SiC-ТРАНЗИСТОРАХ

Баранов В.В., Зимин Р.А., Кишинский А.А., Матвеев А.Д., Суханов Д.А.

ЗАО «Микроволновые системы»

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

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

**Аннотация** - В докладе изложены результаты разработки и экспериментального исследования широкополосных усилителей дециметрового (0.5-2.5 ГГц) диапазона с выходными мощностями в непрерывном режиме от 20 до 200 Вт, выполненных на основе карбид-кремниевых полевых транзисторов.

## I. Введение

При создании широкополосных усилителей мощности в дециметровом диапазоне с выходной мощностью более 20 Вт целесообразно применение карбид-кремниевых (SiC) полевых транзисторов. Выбор данных транзисторов обусловлен рядом преимуществ [1,2]. Одним из них является высокое (28-50В) 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. SiC-транзисторы обладают пробивным напряжением стока более 100 В, высокой удельной мощностью (2-4 Вт/мм), малыми удельными входной (0.5 пФ/мм) и выходной емкостями (0.15 пФ/мм), высокой допустимой рабочей температурой кристалла (до +255 °С). Недостатками SiC-транзисторов является то, что их рабочие частоты не превышают 2.5-3.5 ГГц из-за малой подвижности основных носителей заряда, а также высокая стоимость приборов.

## II. Основная часть

Для проектирования мощных широкополосных усилителей были использованы упрощенные нелинейные модели транзисторов CRF24010F и CRF24060F. Нелинейная модель транзистора CRF24010F получена на основе данных, приведенных в работах [3,4]. Модель транзистора CRF24060F (содержащего внутри корпуса шесть активных структур, аналогичных структуре транзистора CRF24010) получена путем масштабирования (x6) его нелинейной модели с уточнением паразитных параметров корпуса.

При конструировании усилителей был принят ряд мер, которые позволили получить высокий уровень выходной мощности в широкой полосе частот. Снижение омических потерь удалось получить утолщением металлизации на микрополосковых платах. Применялись толстопленочная технология на основе серебросодержащих паст толщиной 20 мкм, и тонкопленочная технология с вакуумным напылением толстых (18-25 мкм) слоев меди. В выходной согласующей цепи были применены распределенные трансформаторные согласующие цепи, обеспечившие минимальные потери и хорошую равномерность выходной мощности

насыщения (1-2 дБ) в октавной полосе частот. Для снижения тепловой нагрузки транзисторов был использован режим класса АВ с начальным током 20-25% от максимального тока канала, что также позволило повысить КПД в динамическом диапазоне. Для лучшего теплоотвода от активных элементов были использованы теплораспределительные основания из меди толщиной 4 мм. Размещение низкочастотной части усилителей в отсеке над высокочастотной частью так же позволило уменьшить тепловую нагрузку за счет сброса тепла стабилизаторов напряжения через боковые стенки.

Параметры исследованных макетов усилителей приведены в таблице 1

Таблица 1.

Параметры	Типы усилителей		
	PM051	PM0816	PM0825-1
Диапазон частот, ГГц	0,5 - 1	0,8 - 1,6	0,8 - 2,5
Выходная мощность, Вт	182 - 269	117 - 137	21,5 - 27,8
Коэффициент усиления, дБ	47,8 - 50,3	45 - 46,6	35,5 - 38,2
Неравномерность АЧХ, дБ	2,5	1,6	2,7
КПД, %	20 - 32	26 - 33	14 - 20
Напряжение питания, В	+48	+48	+48
Токи потребления, А	17,4 - 18,8	8,45 - 9,35	2,9 - 3,2
Габариты, мм3	270x250,2x58,1	231x100x36	142,5x54x35
Масса, кг	8,8	1,31	0,45

Выходной каскад усилителя в диапазоне частот 0,5-1 ГГц (PM051) построен по четырехканальной балансной схеме суммирования на транзисторах CRF24060F. Сумматоры первой ступени выполнены на подложках из поликора толщиной 1 мм, сумматор второй ступени – на симметричных полосковых линиях с лицевой связью. Собственные потери мощности в сумматоре первой ступени составили 0.25-0.3 дБ, в сумматоре второй ступени – 0.12-0.21 дБ. Фрагмент конструкции одного из выходных балансных каскадов показан на рисунке 1.

На макете усилителя PM051 исследована возможность изменения питания транзисторов выходного каскада для управления выходной мощностью насыщения. Установлено, что снижение выходной напряжения питания стока с 48 В до 24 В практически не искажает частотные характеристики усилителя. Выходная мощность при напряжении 24 В составила 100-130 Вт. Усилитель показал свою работоспособность при увеличении КСВН нагрузки до 6 и безотказность в ситуациях обрыва нагрузки.

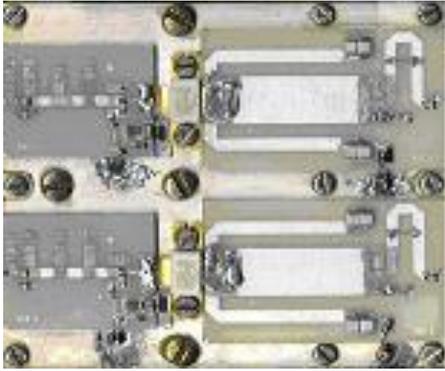


Рисунок 1. Фото усилительного каскада 0.5-1 ГГц  
Figure 1. 0.5-1 GHz balanced amplifier chain.

Выходной каскад усилителя в диапазоне 0.8-1.6 ГГц (PM0816) построен по балансной схеме на транзисторах CRF24060F с сумматором на подложке из поликора. Особенностью данного усилителя является низкие уровни второй и третьей гармоник, которые составили -26 дБ и -23 дБ соответственно, и высокий КПД (26-33%) при питании напряжением 48 В. Так же усилитель способен работать на рассогласованную нагрузку (КСВН = 2...5).

На рисунке 2 показана мощностная АЧХ и КПД усилителя.

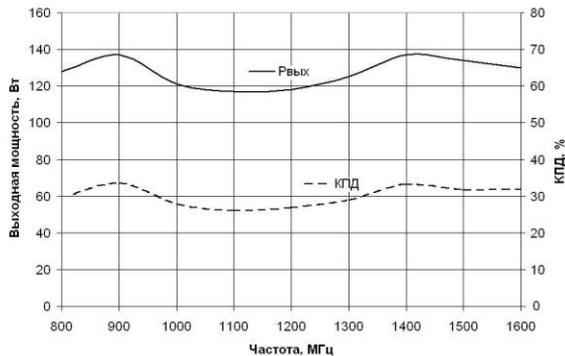


Рисунок 2. Мощностная АЧХ и КПД макета PM0816  
Figure 2. PM0816 power-frequency and efficiency characteristics

Выходной каскад макета усилителя в диапазоне 0.8-2.5 ГГц (PM0825-1) построен по балансной схеме на транзисторах CRF24010F. Конструкция каскада показана на рисунке 3. Согласующие платы и квадратурные спиральные мосты выполнены на подложках из поликора толщиной 0.5 мм по тонкопленочной технологии. Воздушные промежутки между платами и транзисторами являются элементами согласующих контуров, имеющих структуру ФНЧ.

Проблемой, ухудшающей параметры SiC-усилителей, является отсутствие широкополосных транзисторов или монокристаллических интегральных усилителей с напряжением питания 48 В на уровне мощности меньше 10 Вт. В качестве предварительного усилителя в исследованных макетах применена микросхема AM012335-MM-BM с напряжением питания 20 В и выходной мощностью 2 Вт, что существенно снизило общий КПД, в частности, усилителя PM0825-1.

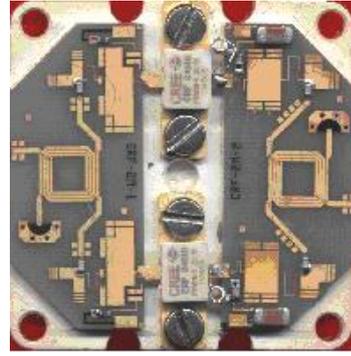


Рисунок 3. Фото усилительного каскада 0.8-2.5 ГГц  
Figure 3. 0.8-2.5 GHz balanced amplifier chain.

### III. Заключение

Использование современных SiC-транзисторов и описанных в работе конструктивных подходов позволяет простыми схемотехническими решениями получить выходные мощности усилителей дециметрового диапазона 100-200 и более Ватт в непрерывном режиме в октавной и сверхоктавной полосе частот, с КПД 20-30 % и высокой равномерностью АЧХ.

### IV. Список литературы

1. W.L.Pribble et al. Application of SiC MESFETs and GaN HEMTs in Power Amplifier Design // IEEE MTT-S Digest, 2002, p.1819-1822.
2. J.W.Palmour et al. SiC and GaN Based Transistor and Circuit Advances // Proc. On 12-th GAAS Symposium, 2004, p. 555-558.
3. A.Sayed, G.Boeck. An Empirical Large Signal Model for Silicon Carbide MESFETs // Proc. On 13-th GAAS Symposium, 2005, p. 313-316.
4. А.А.Кишинский. Усилители мощности диапазона 0.8-2.5 ГГц на SiC-транзисторах. Материалы 16-ой Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", 2006, стр.171-172.