

# УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ ДИАПАЗОНА 0.8-2.5 ГГц НА SiC-ТРАНЗИСТОРАХ

Кищинский А. А.

ЗАО «Микроволновые системы»

ул. Новая Басманная, д.20, кор.3, г. Москва, 105066, Россия

тел.: +7(095) 263-96-29, e-mail: ak@mwsystems.ru; www.mwsystems.ru

**Аннотация** – В докладе изложены результаты разработки и экспериментального исследования параметров гибридно-интегральных усилительных каскадов на основе новых карбид-кремниевых (SiC) транзисторов CRF24010. Реализованы малогабаритные усилительные элементы в диапазоне 0.8-2.5 ГГц с усилением 9–10 дБ и выходной мощностью 10 и 20 Вт.

## I. Введение

Транзисторы на основе широкозонных полупроводниковых соединений (SiC, GaN) привлекают пристальное внимание разработчиков мощных усилителей СВЧ диапазона [1,2]. Это вызвано такими свойствами, как высокая теплопроводность полупроводникового материала (2-4.5 Вт/см<sup>2</sup>·К), высокие рабочие напряжения стока (20-50 В и более), высокая удельная мощность на единицу ширины затвора (3-30 Вт/мм). Сочетание этих свойств позволяет существенно (в 10-20 раз) повысить оптимальный импеданс нагрузки транзистора и реализовать мощные усилительные элементы с более широкой полосой рабочих частот, чем в случае использования GaAs транзисторов равной мощности. Исторически первыми (в 2003 году) на коммерческом рынке полупроводников появились мощные дискретные транзисторы S-диапазона на основе SiC с выходной мощностью 10 и 60 Вт, разработанные фирмой Cree Inc. В настоящей работе исследована возможность создания на основе транзистора CRF24010 мощных усилительных элементов, перекрывающих диапазон частот 0.8-2.5 ГГц с выходной мощностью более 10 Вт для создания на базе этих элементов усилителей с выходной мощностью до 50-100 Вт и более, пригодных для работы в условиях повышенных рабочих температур эксплуатации.

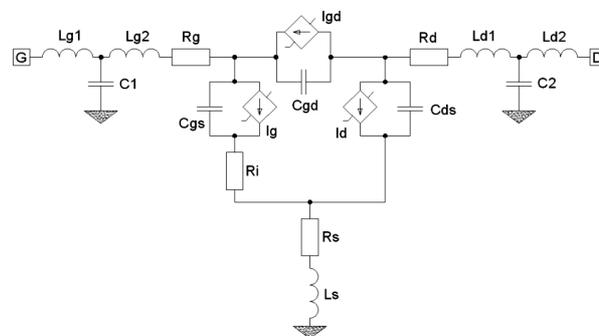
## II. Основная часть

Для исследования параметров транзистора и проектирования согласующих цепей усилительных каскадов была разработана упрощенная нелинейная модель транзистора CRF24010, топология которой показана на рисунке 1.

Специальные измерения на образцах транзисторов не проводились. Исходными данными для разработки модели были S-параметры, приведенные фирмой-изготовителем для двух режимов смещения, геометрические размеры кристаллодержателя и перемычек, соединяющих кристалл транзистора с кристаллодержателем, а также ряд данных, приведенных в работе [3], посвященной моделированию этого транзистора. В модели величины емкостей C<sub>gs</sub>, C<sub>gd</sub> и C<sub>ds</sub> приняты постоянными и не зависящими от напряжений. Величины паразитных параметров корпуса и монтажа (L<sub>g1</sub>, L<sub>g2</sub>, C<sub>1</sub>, L<sub>s</sub>, L<sub>d1</sub>, L<sub>d2</sub>, C<sub>2</sub>) определялись по результатам электродинамического моделирования геометрии соответствующих элементов.

Величины C<sub>gs</sub>, C<sub>gd</sub>, C<sub>ds</sub>, R<sub>i</sub>, R<sub>g</sub>, R<sub>d</sub>, R<sub>s</sub> определены по результатам подгонки S-матриц, приведен-

ной изготовителем и рассчитанной по линеаризованной модели при фиксированных величинах паразитных элементов. Параметры нелинейного источника тока I<sub>d</sub> получены аппроксимацией статических вольтамперных характеристик, приведенных в [3], модифицированных так, чтобы удовлетворять ряду условий динамического режима (величины динамической выходной проводимости и крутизны, соответствующие полученным из S-параметров) и расширенных в сторону больших напряжений и токов. Параметры аппроксимаций источников I<sub>g</sub> и I<sub>gd</sub> получены из статических измерений [3] и паспортных данных транзистора.



Тип модели: MATERKA		
Lg1= 0.09 nH	MGS=1	E=1
Lg2= 0.405 nH	FCC=0.01	SL=0.35
Ls = 0.06 nH	CF0=0.607 pF	KE=-0.0973
Ld1= 0.405 nH	KF=0	SS=0.007
Ld2= 0.09 nH	Rg = 1.03 Ohm	KG=0.1
C1 = 1.12 pF	Rs = 1.205 Ohm	IG0=3.43e-9 A
C2 = 1.12 pF	Rd = 1.25 Ohm	AFAG=14.98
Cds = 0.74 pF	R10 = 1.03 Ohm	IB0=9.36E-10 F
CLVL=1	KR=0	AFAB=14.98
C10 = 2.32 pF	IDSS=1.55 A	VBC = 116 V
C1S = 0	VP0=-13.2 V	T=3 ps
K1=0	GAMA=-0.14	

Рис. 1. Нелинейная модель транзистора.

Fig. 1. Transistor nonlinear model

Проектирование выходной согласующей цепи (СЦ) однотранзисторного усилительного каскада (CRF-1) выполнялось по методу [4] исходя из принятой величины оптимального нагружающего сопротивления в плоскости источника тока I<sub>d</sub>, равного 47 Ом и с учетом всех паразитных реактивных элементов модели. Входная согласующая цепь оптимизировалась по критерию максимального и равномерного усиления в полосе частот 0.8-2.5 ГГц. Пассивные элементы реализованы на двух платах из керамики «поликор», изготовленных по тонкопленочной технологии, разделительные и блокировочные конденсаторы применены из серии 600L фирмы АТС. Конструкция каскада показана на рисунке 2.

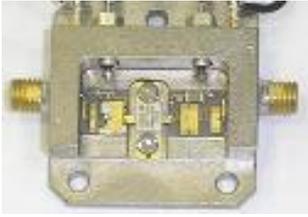


Рис. 2. Фото усилительного каскада CRF-1.

Fig. 2. CRF-1 amplifier stage

Сравнение расчетных и измеренных частотных характеристик выходной мощности каскада, приведенных на рисунке 3, показывает их хорошее соответствие, что подтверждает корректность использования разработанной упрощенной нелинейной модели транзистора.

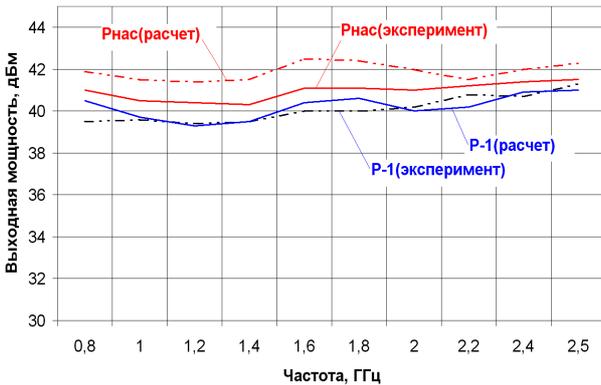


Рис. 3. Мощностные АЧХ каскада CRF-1.

Fig. 3. CRF-1 power-frequency characteristics

Выходная мощность макета CRF-1 при компрессии усиления 1 дБ в полосе рабочих частот 0.8-2.5 ГГц составила 8.5-12.5 Вт, выходная мощность в режиме насыщения (при уровне входной мощности 4 Вт) находится в пределах 10.8-14 Вт. Малосигнальный коэффициент усиления составляет 9-11 дБ. КПД по добавленной мощности в режиме компрессии усиления 1 дБ (ток стока 0.7-0.78 А) составил от 19 до 31 %. Все измерения и расчеты по нелинейной модели проводились при начальном токе стока 0.6 А и напряжении стока 48 В. Снижение начального тока стока до рекомендованных изготовителем 0.25-0.5 А сохраняет выходную мощность насыщения и позволяет несколько повысить КПД, однако, значительно изменяет форму динамической характеристики и снижает уровень линейной мощности.

Конструкция балансного усилителя (CRF-2) показана на рисунке 4. Два канала усиления, идентичных CRF-1 объединены в балансную схему при помощи мостов Ланге. Параметры усилителя приведены в таблице 1, иллюстрирующей также параметры, полученные на этом транзисторе другими авторами [5,6]. Выходная мощность насыщения каскада составила 20.5-30 Вт, КСВН входа не превышал 1.8, КСВН выхода менее 2.1 на нижнем краю диапазона и 1.5 выше частоты 1 ГГц.

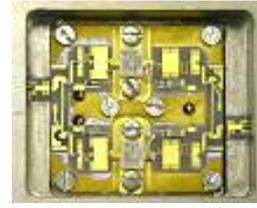


Рис. 4. Фото усилительного каскада CRF-2.

Fig. 4. CRF-2 balanced amplifier stage

Таблица 1.

Table 1.

Results	Circuit	$\Delta F$	$G_{ss}$	$\Delta G_{ss}$	$P_{-1}$	$P_{sat}$	PAE	Size
		GHz	dB	dB	W	W	% @ $P_{-1}$	cm <sup>2</sup>
CRF-1	SE	0.8-2.5	9.1-11.1	±1.0	8.5-12.5	10.8-14	19-31	4.8
	BAL	0.8-2.5	8.6-10.4	±0.9	16-22.5	20.5-30	18-24	9.6
[5]	SE	1.7-2.3	11.0-13.5	±1.25	8.5-12.0	--	--	~17
[5]	BAL	1.9-2.3	11.5-13.0	±0.75	18-22	--	--	~60
[6]	FB	0.01-2.4	6.3-8.0	±0.85	5-6	>8.0	28-29	--

### III. Заключение

Показана возможность создания и исследованы характеристики миниатюрных ГИС усилителей мощности на базе корпусных карбид-кремниевых транзисторов, обеспечивающих выходную мощность 10 и 20 Вт в полосе частот 0.8-2.5 ГГц. Полученные технические решения могут служить базой для разработки сверхширокополосных усилителей L-S диапазона с выходной мощностью 50-100 и более Ватт.

### 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] C. S. Cripps. A theory for the prediction of GaAs FET load-pull power contours//1983 IEEE MTT-S Digest, p.221-223.
- [5] T. W. Nichols. Broadband Amplifier Design Using SiC MESFETs // Microwave Product Digest, 2002, October, p.22,52
- [6] A. Sayed, G. Boeck. Two-Stage Ultrawide-Band 5-W Power Amplifier Using SiC MESFET // IEEE Trans. MTT, Vol. 53, No. 7, July 2005, p. 2441 – 2449.

### 0.8-2.5 GHz SiC POWER AMPLIFIERS

A. Kistchinsky

Microwave Systems JSC  
20, Novaja Basmannaja street,  
Moscow, 105066, Russia

Ph.: +7(095) 263-96-29, e-mail: ak@mwsystems.ru

**Abstract** – Presented are the results of elaboration of 0.8-2.5 GHz SiC-based amplifiers with output power 10 & 20 W at 1dB gain compression, as well as efficient nonlinear model of CRF24010 (Cree Inc.) transistor, simulation results, design and experimental characteristics of two amplifier chains (single-ended and balanced). Both amplifiers have ultra-small sizes (4.8 and 9.6 cm<sup>2</sup>) and good electric performance.