

*Груша А.В., Крутов А.В., Ребров А.С.  
АО «НПП «Исток» им. Шокина»*

## **Нелинейная ЕЕНЕМТ модель серийного транзистора ЗПЗ107АН**

*В докладе представлены результаты восстановления параметров нелинейной ЕЕНЕМТ модели малошумящего гетероструктурного транзистора с повышенным динамическим диапазоном на GaAs. Приведены результаты численного моделирования и экспериментальных измерений транзистора.*

**Ключевые слова:** малошумящий транзистор, нелинейная модель транзистора, ЕЕНЕМТ, Load Pull.

При проектировании усилителей разработчики используют в качестве исходных данных либо справочные данные оптимальных нагрузок транзисторов, которые приводятся в технической документации, либо пользуются нелинейной моделью, которая описывает работу транзистора в режиме большого сигнала. Справочные данные приводятся, как правило, на одной частотной точке при одном, двух режимах смещения [1], что препятствует их использованию для успешного проектирования приборов в других частотных диапазонах, особенно для проектирования широкополосных и сверхширокополосных усилителей.

Существует два принципиально разных типа представления нелинейной модели:

— табличная модель, в которой все нелинейные элементы представлены в виде полиномов или сплайнов [2]

— формульная модель, в которой нелинейные элементы описываются аналитическими зависимостями [3].

Каждый тип имеет свои преимущества и недостатки. Наибольшее распространение в современных пакетах проектирования получили формульные модели. Ведущие фирмы, такие как WIN (Тайвань), OMMIC (Франция), используют при проектировании GaAs PHEMT, MHEMT транзисторов ЕЕНЕМТ модель, как наиболее продвинутую.

Целью данной работы является построение нелинейной ЕЕНЕМТ модели транзистора ЗПЗ107АН [4]. Данный транзистор позиционируется как малошумящий транзистор с повышенным динамическим диапазоном, поэтому для успешного проектирования усилителей с учетом работы в режиме большого сигнала недостаточно линейной модели.

Транзистор изготовлен на 100 мкм подложке из арсенида галлия. Ширина затвора транзистора составляет 160 мкм и состоит из четырех пальцев по 40 мкм. Истоки транзистора соединены между собой с помощью двухуровневой металлизации с изоляцией через диэлектрик толщиной 0,8 мкм.

Фотография транзистора приведена на Рис. 1.

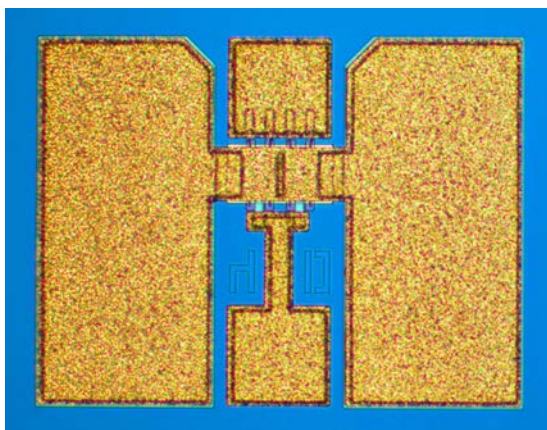


Рис. 1. Микрофотография кристалла транзистора 3ПЗ107АН

*Методика восстановления параметров*

В работе использовалась модель транзистора (EESof Scalable Nonlinear HEMT Model) из стандартной библиотеки Advanced Design System [5]. Эквивалентная схема транзистора с паразитными параметрами представлена на рис.2.

Были проведены необходимые измерения партии транзисторов:

– Измерение S-параметров в диапазоне частот 1-40 ГГц, в широком спектре питающих напряжений;

– Измерение Load Pull;

Все измерения транзисторов проводились на пластине, на зондовой станции.

Далее была проведена статистическая обработка результатов измерений с построением усредненных параметров транзистора.

Затем были определены паразитные параметры транзистора - сопротивление, индуктивность и емкость контактных площадок ( $R_g$ ,  $R_d$ ,  $R_s$ ,  $L_g$ ,  $L_d$ ,  $L_s$ ,  $C_{gp}$ ,  $C_{dp}$ ). Вычисление значений паразитных элементов проводили путем «холодных» измерений по методике [6]. Дальнейшая экстракция параметров проводилась путем оптимизации параметров модели по усредненным S-параметрам, вольтамперных, вольтфарадных характеристик.

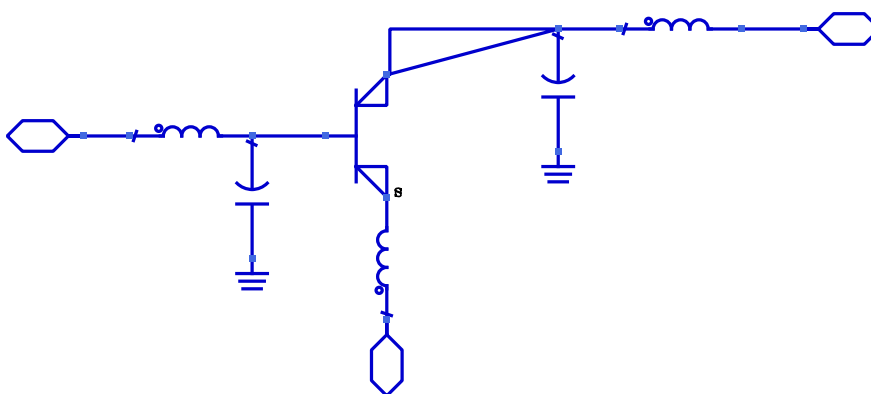


Рис. 2. Эквивалентная схема транзистора 3ПЗ107АН

В таблице 1 представлены параметры модели транзистора 3П3107АН.

Таблица 1 – Параметры восстановленной модели транзистора

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
Ugw, um	40	Vto, V	-1,07	Delts, V	0,68
Ngf	4	Vgo, V	-0,225	Lambda	0,11
Lg, pH	20,5	Gamma	106,8	Kbk	2,1e-9
Cgp, fF	10	Vdelt, V	84	Vco, V	-0,154
Rg, Ohm	1,55	Vch, mV	35	Vba, V	5
Ld, pH	43,16	Kapa, mS	97,71	Vbc, mV	281
Cdp, fF	12	Peff	1,7	Idsoc, A	1,89
Rd, Ohm	5,1	Vtso, V	-0,636	Deltgm	0,161
Ls, pH	7,2	Is, A	$9,3 \times 10^{-13}$	Deltgmac	0,343
Rs, Ohm	1,9	N	1,478	Alpha, mV	250
C12sat, fF	25,9	Ris, Ohm	0,1	Tau, psec	0,85
Cgdsat, fF	32,8	Rid, mOhm	1	Vtsoac, V	-0,7
C11o, fF	160	Cbs, fF	1	Gammaac	0,056
C11th, fF	114	Gdbm, uF	5	Vbr, V	0,45
Cdso, fF	45	Deltgs, V	0,66	Nbr	5,44

#### Результаты эксперимента и моделирования

Ниже приводятся результаты эксперимента и моделирования. На рис.3 приведена ВАХ транзистора 3П3107АН. На рис.4 приведена сток-затворная характеристика и профиль крутизны транзистора.

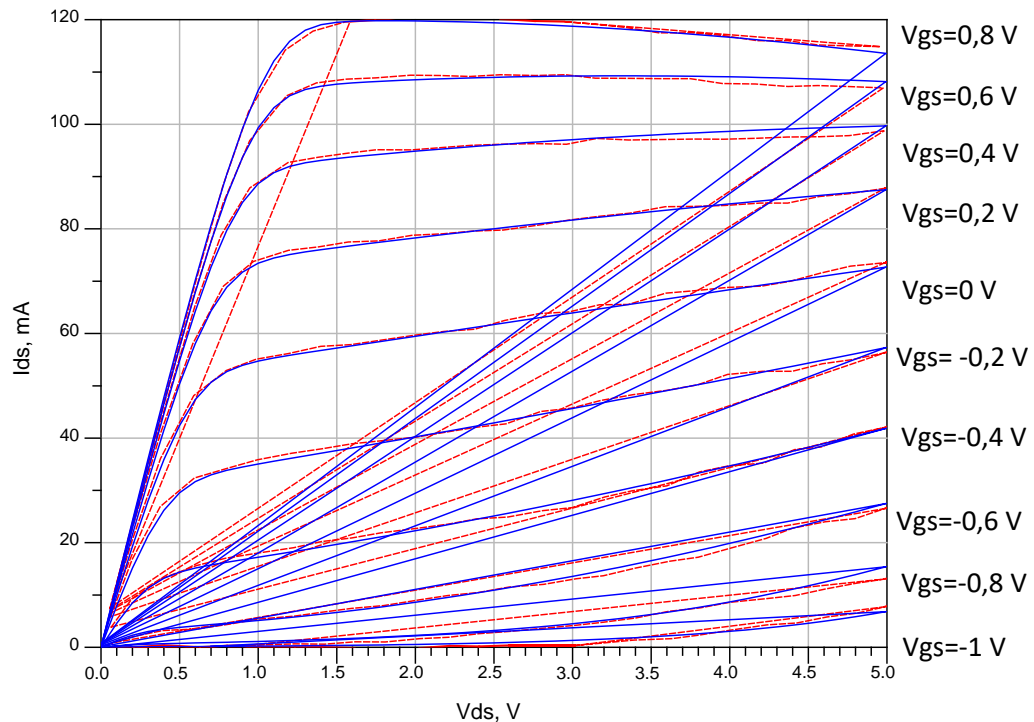


Рис. 3. Расчетная (сплошная линия) и измеренная (пунктирная линия) ВАХ транзистора

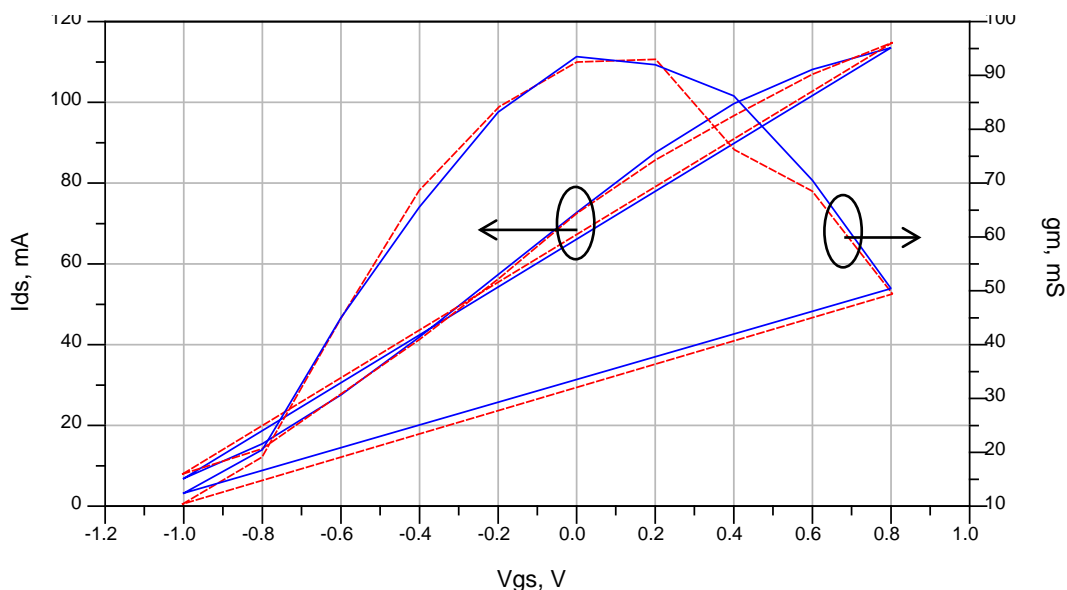


Рис. 4. Расчетная (сплошная линия) и экспериментальная (пунктирная линия) сток-затворная характеристика и профиль крутизны транзистора

На рис.5 представлено сравнение малосигнальных S-параметров. Измерения проводились в режиме транзистора по постоянному току  $V_{ds}=2$  В,  $I_{ds}=15$  мА.

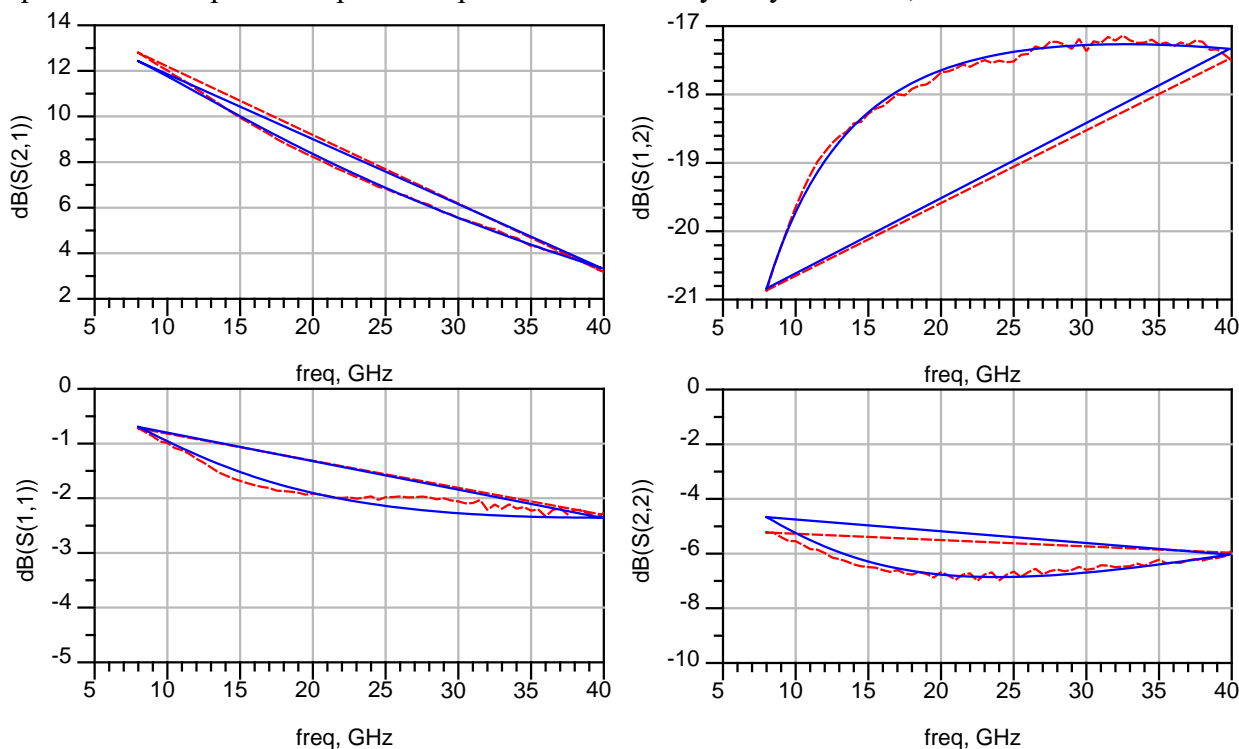


Рис. 5. Расчетная (сплошная линия) и экспериментальная (пунктирная линия) малосигнальные S-параметры транзистора 3П3107АН

Было проведено моделирование значений оптимальных нагрузок (Load Pull) для режима максимальной выходной мощности в режиме по постоянному току  $V_{ds} = 5$  В,  $V_{gs} = -0,5$  В. На рис. 6 приведены характеристики модели транзистора на частоте 40 ГГц, при согласовании на максимальную выходную мощность.

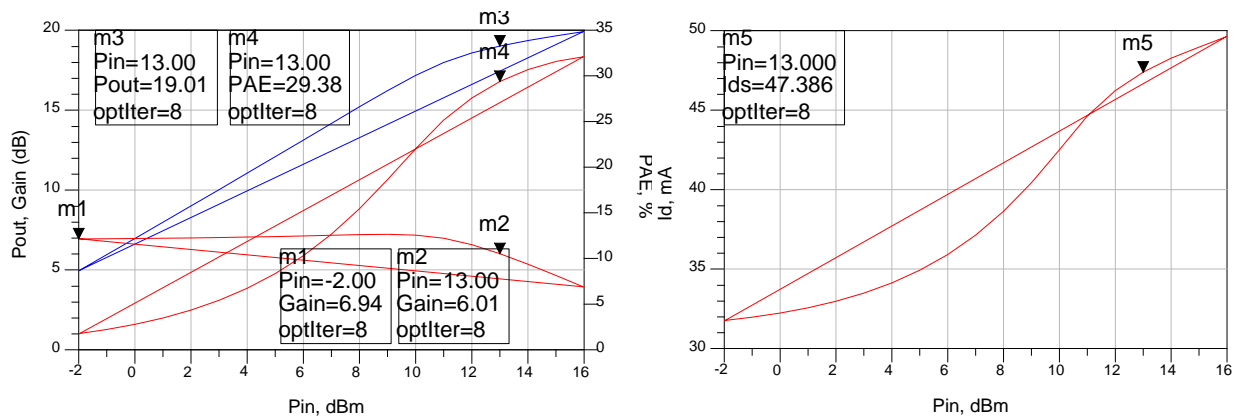


Рис.6 Динамические характеристики транзистора

Результаты моделирования и измерений Load Pull при согласовании на максимальную выходную мощность приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение результатов моделирования и измерений Load Pull (40 ГГц)

Параметр	Ед.изм.	Результат измерений	Результат моделирования
Psat	dBm	19,2	19,5
PAE	%	27,9	29,8
Gain	dB	6,8	6,9
Zload	Ohm	14,825+j14,375	14,973+j14,164

### Заключение

В докладе приведена методика восстановления параметров нелинейной ЕЕНЕМТ модели транзистора 3П3107АН. Сравняются результаты моделирования с экспериментальными измерениями. Модель верифицирована проведением измерений оптимальных нагрузок (Load Pull) на верхней частоте рабочего диапазона (40 ГГц). Предложенная нелинейная ЕЕНЕМТ модель имеет хорошее совпадение с экспериментальными измерениями. Полученные данные могут найти практическое применение при разработке усилителей и других нелинейных устройств, а методика построения модели для моделирования транзисторов собственного производства.

### Библиографический список

1. Каталог фирмы Triquint Semiconductor TGF2022-06, 2005.
2. Дмитриенко К.С., Бабак Л.И. Построение табличной нелинейной модели РНЕМТ транзистора. Материалы конференции [Севастополь, 10-14 сент. 2009г.]. Севастополь: Вебер, 2005, с.119-120.
3. Климова А.В., Королев А.Н. и др. Сравнение нелинейных моделей для транзисторов с субмикронным затвором. Радиотехника, 2006г, №3 с.72-77.
4. Крутов А. В., Кувшинова Н. А., Ребров А. С. Малошумящий GaAs РНЕМТ транзистор с повышенным динамическим диапазоном 3П3107. Материалы 7-ой международной конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 2016, Санкт-Петербург, 2016, с. 96-97.
5. Advanced Design System 2017 Nonlinear Devices., Keysight Technologies, 2017, pp. 445-473.
6. G. Dambrine et al, A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit. IEEE MTT-36 (7), 1988.