

# Экстракция параметров модели GaN HEMT для расчета параметров СВЧ ИС, функционирующих в непрерывном режиме, с учетом эффектов саморазогрева

И.О. Метелкин, С.В. Миннебаев, Д.А. Шишкин

АО «Микроволновые системы»

**Аннотация:** в данной работе приведена методика экстракции параметров электрической эквивалентной схемы GaN HEMT на основе стандартизованной нелинейной модели ASM-HEMT для расчета параметров СВЧ ИС, функционирующих в непрерывном режиме. Значения параметров, характеризующих эффекты саморазогрева, определялись на основе анализа статических ВАХ и S-параметров тестовых структур HEMT с различными топологическими параметрами, с предварительной идентификацией параметров последовательного сопротивления на основе TLM структур. Верификация полученной модели проводилась на основе расчета характеристик усилителя мощности с диапазоном рабочих частот 4-18 ГГц.

**Ключевые слова:** GaN HEMT, ASM-HEMT, SPICE-модель, экстракция параметров.

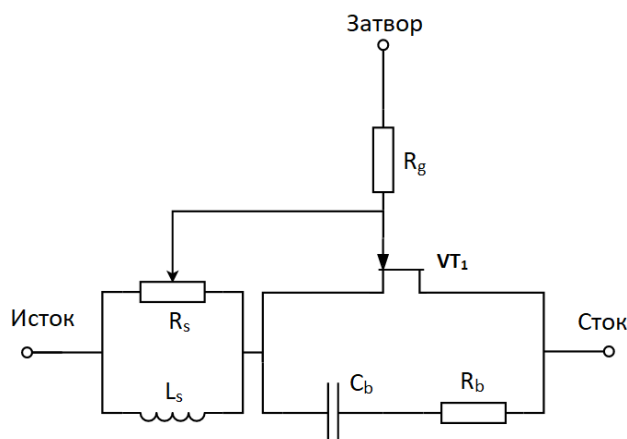
## 1. Введение

Благодаря обеспечению высокой выходной мощности и работе в СВЧ диапазоне технологические процессы на основе GaN в настоящее время являются востребованными при разработке РЭА. Но разработка СВЧ ИС на их основе существенно осложнена ввиду особенностей моделирования транзисторных структур [1]. Вследствие влияния эффектов саморазогрева и ловушечных уровней в буферном слое и на границах разделов характеристики GaN HEMT могут существенно различаться в непрерывном и импульсном режимах. Между тем, модели, поставляемые фабриками в составе комплекта средств проектирования (PDK), как правило предназначены для использования в импульсном режиме и в ряде случаев демонстрируют некорректное поведение при расчете СВЧ ИС, функционирующих в непрерывном режиме [2].

В рамках данной работы разработана методика экстракции параметров моделей GaN HEMT предназначенных для расчета параметров СВЧ ИС, функционирующих в непрерывном режиме. Апробация разработанной методики была проведена на примере экстракции параметров модели транзистора с топологией  $2 \times 100$  мкм из состава библиотеки коммерческого технологического процесса с проектной нормой 0,25 мкм. Дальнейшая верификация модели проводилась на примере расчета усилителя мощности.

## 2. Модель GaN HEMT для СВЧ ИС, функционирующих в непрерывном режиме

Электрическая эквивалентная схема (ЭЭС) нелинейной модели GaN HEMT, используемой в данной работе приведена на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Электрическая эквивалентная схема нелинейной модели GaN HEMT

Ядром ЭЭС (элемент VT) является стандартная модель ASM-HEMT, описывающая характеристики GaN HEMT с учетом влияния нелинейного сопротивления ДЭГ в областях между затвором и контактами стока и истока, структур field-plate и эффектов саморазогрева с использованием стандартной дополнительной тепловой электрической схемы [3].

Элемент  $R_g$  введен для учета сопротивления контакта затвора. Ёмкостной ( $C_b$ ) и резистивный ( $R_b$ ) элементы частично учитывают влияние ловушечных уровней в буферном слое и подложке. Дополнительная RL-цепь, включенная между истоком модели VT и внешним выводом истока введена для учета эффектов сдвига порогового напряжения и увеличения последовательного сопротивления [1].

### 3. Методика экстракции параметров

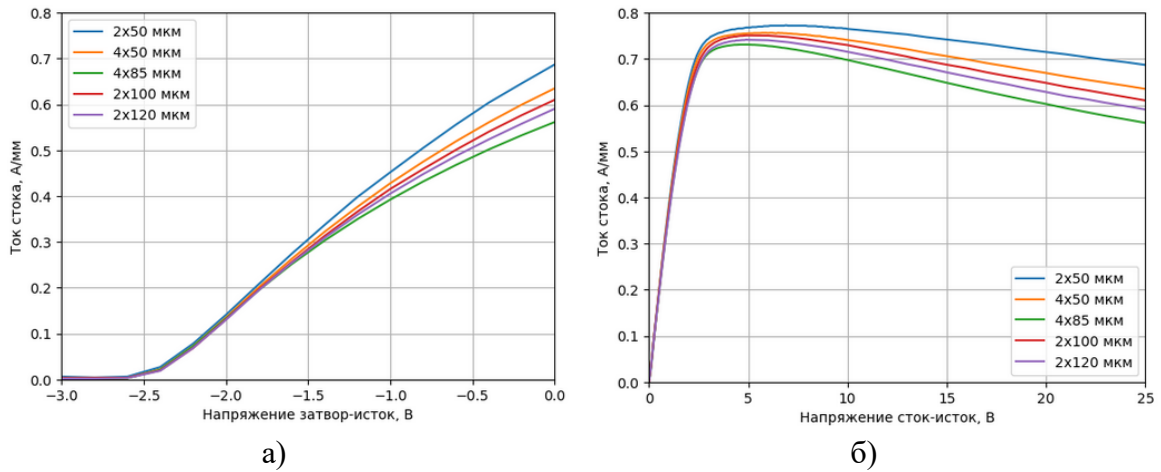
В качестве исходных данных для экстракции параметров модели использовались результаты измерений статических ВАХ TLM-структур и HEMT с различной топологией, изготовленных в рамках исследуемого технологического процесса, и S-параметры тестовой структуры моделируемого транзистора  $2 \times 100$  мкм в различных электрических режимах.

Измерения ВАХ производились зондовыми методами с использованием анализатора параметров полупроводниковых приборов Keysight B1500. Измерения S-параметров также производились зондовыми методами с использованием векторного анализатора цепей Planar C1220 в диапазоне частот 10 МГц...20 ГГц и источников статического питания для задания электрического режима.

Экстракция параметров модели производилась оптимизационными методами с использованием специализированного программного модуля на основе SPICE-симулятора с открытым кодом Ngspice [4] и включала в себя пять этапов.

На первом этапе на основе результатов измерений ВАХ TLM структур определялись параметры, характеризующие нелинейное последовательное сопротивление областей стока и истока.

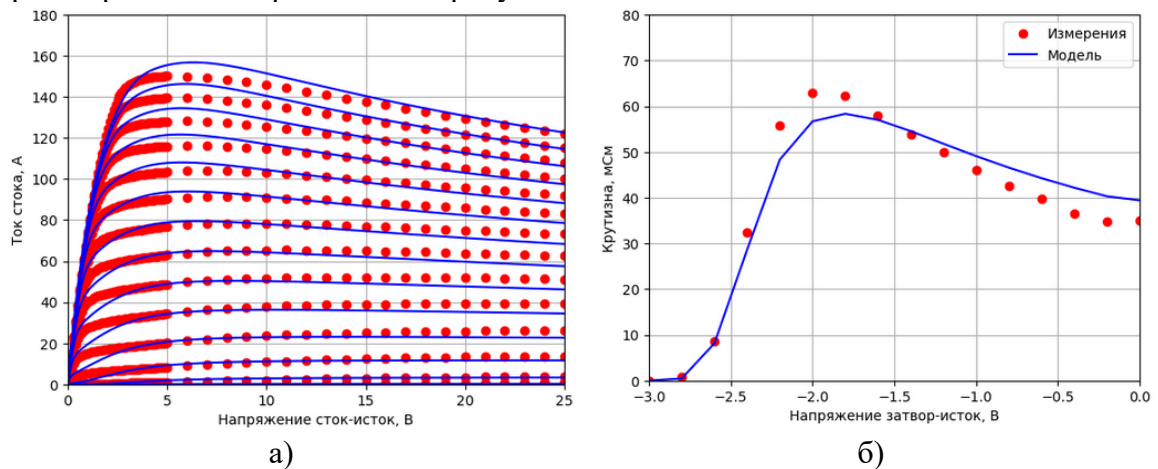
На втором этапе был определен диапазон токов, в которых не наблюдается существенного влияния эффектов саморазогрева, по критерию отсутствия зависимости ВАХ от топологических параметров. Согласно результатам измерений, приведенным на рисунке 2а, данным диапазоном является  $0 \dots 200$  мА/мм.



**Рисунок 2.** Результаты измерений проходной ВАХ при напряжении сток-исток 25 В (а) и выходной ВАХ при напряжении сток-исток 0 В (б) GaN HEMT с различной топологией

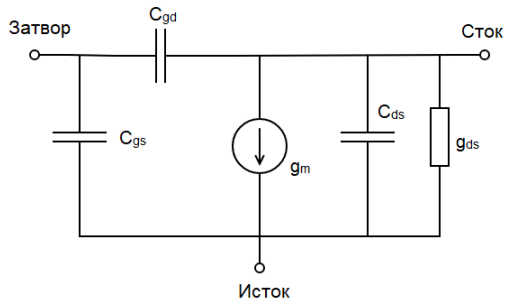
На основе ВАХ моделируемого прибора в указанных электрических режимах были определены параметры модели, характеризующие напряжение отсечки и крутизну при малых токах.

На третьем этапе с использованием аналитической модели зависимости теплового сопротивления GaN HEMT структур от ширины затвора транзистора, описанной в [5], и ВАХ транзисторов с различной топологией в области больших токов (рисунок 2б) были определены параметры тепловой зависимости тока насыщения и теплового сопротивления подложки. Результаты расчета ВАХ и крутизны после выполнения первых трех этапов приведены на рисунке 3.

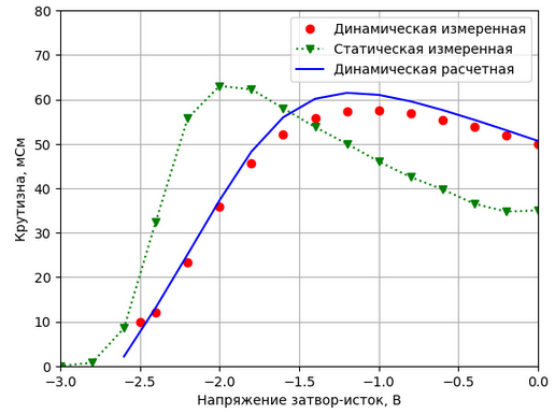


**Рисунок 3.** Выходная ВАХ (а) и крутизна транзистора 2x100 (б)

На четвертом этапе на основе результатов измерения S-параметров тестовой структуры моделируемого транзистора в различных электрических режимах был проведен расчет параметров малосигнальной электрической эквивалентной схемы (рисунок 4а), по результатам которого были определены значения емкостных параметров модели и сопротивления затвора.



а)



б)

**Рисунок 4.** Малосигнальная ЭЭС (а) и крутизна (б) GaN НЕМТ

На пятом этом этапе по соответствию зависимостей динамической крутизны от напряжения затвор-исток (рисунок 4б), рассчитанных на основе измеренных S-параметров и по результатам SPICE-моделирования были определены значения параметров  $R_S$  и  $L_S$  и емкости в цепи саморазогрева модели ASM-HEMT.

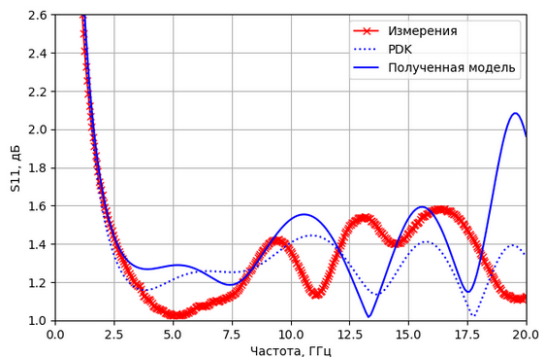
#### 4. Верификация модели

Верификация полученной модели GaN НЕМТ проводилась на примере расчета характеристик широкополосного усилителя мощности (ШПУ), основные параметры которого приведены в таблице 1.

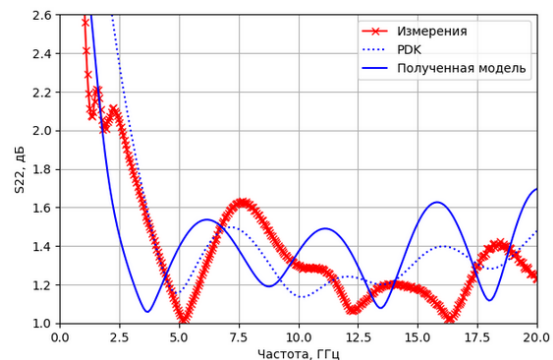
**Таблица 1.** Параметры ШПУ для верификации

Диапазон частот	4-18
Усиление, дБ	от 8 до 10 дБ
Неравномерность АЧХ, дБ	< 2
КСВН входа и выхода	< 2
Выходная мощность, Вт	> 2,5
Ток потребления, А	< 0,5

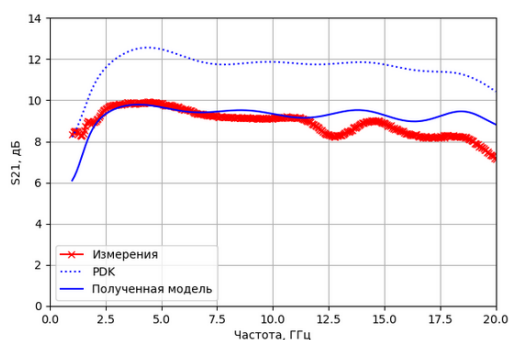
Результаты зондовых измерений и расчета с использованием разработанной модели и модели из состава PDK, приведены на рисунке 5.



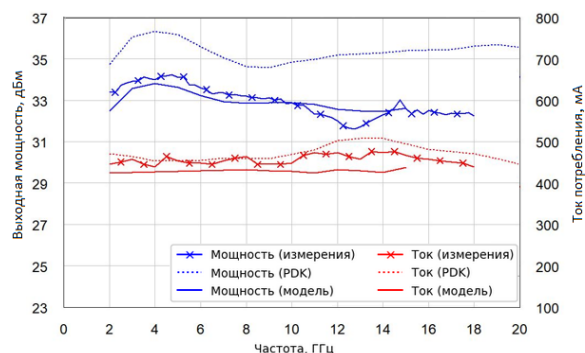
а)



б)



в)



г)

**Рисунок 5.** Результаты измерений и расчета КСВН по входу(а), КСВН по выходу (б), малосигнального S21(в), выходной мощности и тока потребления (г) ШПУ

Согласно приведенным данным, разработанная модель позволяет получить более близкие к измеренным характеристикам значения по сравнению с PDK, что может быть связано с использованием фабрикой импульсных результатов измерений в качестве исходных данных для разработки модели.

## 5. Заключение

В результате работы разработана методика экстракции параметров модели GaN НЕМТ для расчета характеристик СВЧ ИС, функционирующих в непрерывном режиме.

Работоспособность методики подтверждена по результатам апробации на примере экстракции параметров модели GaN НЕМТ из состава библиотеки технологического процесса с проектной нормой 0,25 мкм и её верификации в составе ШПУ с диапазоном частот 4-18 ГГц. Расхождение расчетных и измеренных характеристик ШПУ не превышает 10 %, что существенно точнее результатов, полученных с использованием PDK, разработанным на основе характеристик, измеренных в импульсном режиме.

### Список литературы

1. Luo H., Hu W., Guo Y. On large-signal modeling of GaN HEMTs: Past development and future // *Chip*, vol. 2, no. 3, Sep. 2023.
2. Кондратенко А.В., Шишкин Д.А., Щербаков А.С., Миннебаев С.В. GaN МИС усилителя мощности X-диапазона с функцией контроля уровня выходной мощности // Тезисы докладов юбилейной научно-технической конференции АО «НПП «Исток» им. Шокина» «СВЧ-Электроника-2023». – 25-26 мая 2023 г. – С. 37-38.
3. Khandelwal S., Chauhan Y. S., Fjeldly T. A. et al. ASM GaN: Industry standard model for Gan RF and power devices—part 1: DC, CV and RF model // *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 66, no. 1, pp. 80-86, 2019.
4. Метелкин И.О., Миннебаев С.В. Экстракция параметров GaN НЕМТ для построения модели ASM-HEMT с использованием симулятора Ngspice // *Электронная Техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы.* – 2024 г. – вып. 1 (272). – С. 61-71.
5. Darwish A.M., Bayba A.J., Hung H.A. Thermal Resistance Calculation of AlGaIn–GaIn Devices // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 11, pp. 2611-2620, 2004.