УДК 621.382.323

А.А. Коколов, Л.И. Бабак

Методика построения малосигнальной модели СВЧ-транзистора с высокой подвижностью электронов

Описывается методика построения (экстракции) малосигнальной эквивалентной схемы СВЧ-транзистора с высокой подвижностью электронов на основе измеренных *S*-параметров. Приведен пример применения методики для построения малосигнальной модели транзистора, выполненного по отечественной 0,13 мкм GaAs mHEMT-технологии.

Ключевые слова: СВЧ, монолитная интегральная схема, HEMT-транзистор, малосигнальная модель, экстракция.

Введение. Создание СВЧ монолитных интегральных схем (МИС), основанных на использовании транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT – High Electron Mobility Transistor), является перспективным направлением в современной радиоэлектронике. Наибольшее распространение получили GaAs pHEMT (псевдоморфные) и mHEMT (метаморфные) технологии изготовления СВЧ МИС.

Проектирование нелинейных СВЧ-устройств осуществляется с помощью нелинейных моделей (эквивалентных схем) активных приборов, описывающих их характеристики в широком диапазоне частот и рабочих режимов. Для определения зависимостей нелинейных элементов эквивалентной схемы от напряжений смещения используются методы экстракции (определения параметров) малосигнальной модели, исходя из измеренных параметров рассеяния в различных рабочих точках. От точности определения параметров малосигнальной модели зависит точность нелинейной модели. Кроме того, значения элементов эквивалентной схемы представляют важную информацию инженерам-технологам о влиянии конструктивных и технологических параметров на характеристики транзистора.

Существует множество методов экстракции параметров малосигнальной модели [1–4]. Эти методы можно разделить на аналитические [2, 3], оптимизационные [4, 5] и комбинированные [1]. Аналитические методы требуют проведения дополнительных измерений в «холодном режиме», что может привести к деградации затвора [1]. При этом во многих работах отмечено неудовлетворительное совпадение измеренных и смоделированных *S*-параметров [5]. Значения элементов эквивалентной схемы, полученные при помощи оптимизационных методов, не требуют дополнительных измерений, но зависят от начального приближения и выбранного алгоритма оптимизации. В этом случае найденные величины элементов могут сильно отличаться от их реальных (физических) значений.

В данной работе предлагается надежная комбинированная методика экстракции малосигнальной модели из измеренных *S*-параметров, использующая преимущества аналитических и оптимизационных методов.

Процедура экстракции. Малосигнальная модель СВЧ полевого транзистора представлена на рис. 1 [1]. Модель состоит из внутренней и внешней частей. Во внутреннюю часть входят: R_{gs} (R_i) – сопротивление затвора; C_{gs} – емкость затвор–исток; C_{gd} – емкость затвор–сток; C_{ds} – емкость сток-исток; G_{ds} – проводимость сток–исток; I_{ds} – источник тока стока, управляемый напряжением затвор–исток; g_m – крутизна; τ – постоянная времени частотной зависимости источника тока.

Паразитные элементы внешней части представлены индуктивностями L_g, L_s, L_d и сопротивлениями R_g, R_s, R_d.

Приведенная малосигнальная модель достаточно точно описывает поведение HEMT (pHEMT, mHEMT) транзисторов в диапазоне частот до 60 ГГц [4].

Предлагаемая процедура экстракции малосигнальной эквивалентной схемы включает три основных этапа.

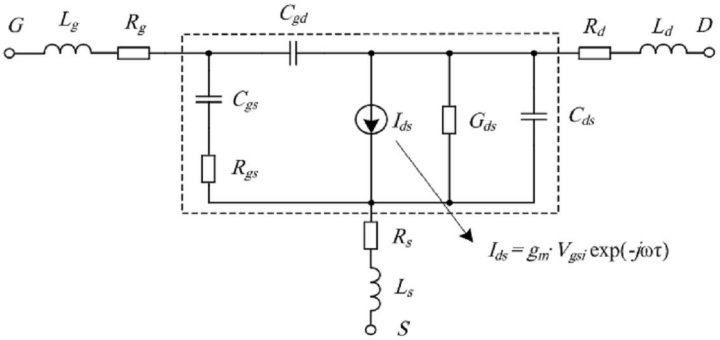


Рис. 1. Малосигнальная модель полевого транзистора

На первом этапе определяются внешние паразитные параметры транзистора из измерений в «холодных» режимах (при нулевом напряжении на стоке) по методам, представленным в [1] и [2].

На втором этапе определяются Y-параметры внутренней части транзистора путем вычитания внешних элементов по методу, описанному в [2]. Точность определения внутренних частотно-независимых элементов сильно зависит от правильности определения внешних параметров. Решая систему уравнений, связывающую полученные Y-параметры с внутренними элементами, можно получить следующие выражения для значений этих элементов [3]:

$$C_{gd} = -\frac{\mathrm{Im}(Y_{12})}{\omega}. \quad (1)$$

$$C_{gs} = \frac{\mathrm{Im}(Y_{11}) - \omega \cdot C_{gd}}{\omega} \cdot \left(1 + \frac{\left(\mathrm{Re}(Y_{11})\right)^2}{\left(\mathrm{Im}(Y_{11}) - \omega \cdot C_{gd}\right)^2}\right). \quad (2)$$

$$R_i = \frac{\mathrm{Re}(Y_{11})}{\left(\mathrm{Im}(Y_{11}) - \omega \cdot C_{gd}\right)^2 + \left(\mathrm{Re}(Y_{11})\right)^2}. \quad (3)$$

$$g_m = \sqrt{\left(\left(\mathrm{Re}(Y_{21})\right)^2 + \left(\mathrm{Im}(Y_{21}) + \omega \cdot C_{gd}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \left(\omega \cdot C_{gs} \cdot R_i\right)^2\right)}. \quad (4)$$

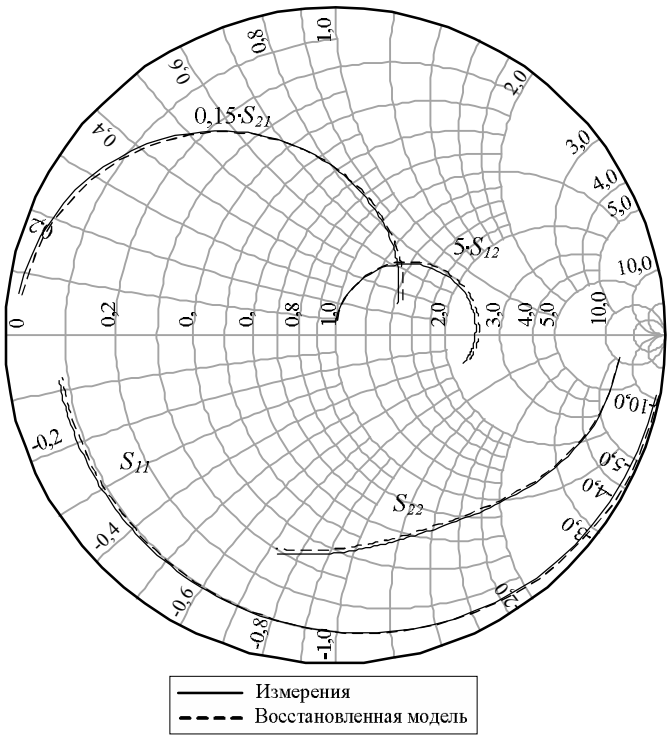
$$\tau = \frac{1}{\omega} \cdot \arcsin\left(\frac{-\omega \cdot C_{gd} - \mathrm{Im}(Y_{21}) - \omega \cdot C_{gs} \cdot R_i \cdot \mathrm{Re}(Y_{21})}{g_m}\right). \quad (5)$$

$$C_{ds} = \frac{\mathrm{Im}(Y_{22}) - \omega \cdot C_{gd}}{\omega}. \quad (6)$$

$$G_{ds} = \mathrm{Re}(Y_{22}). \quad (7)$$

Уравнения (1) – (7) справедливы во всем частотном диапазоне и при напряжении на стоке больше 0 В.

На третьем этапе производится оптимизация значений элементов эквивалентной схемы с целью наилучшего соответствия измеренных и смоделированных S-параметров.



а

C_{gs}	0,243 пФ	R_g	0,29 Ом
R_i	1, 3 Ом	R_s	1,24 Ом
C_{gd}	16,5 фФ	R_d	1,1 Ом
g_m	76,1 мСи	L_g	39,7 пГн
τ	1,55 пс	L_s	1,7 пГн
R_{ds}	629 Ом	L_d	28,8 пГн
C_{ds}	68,8 фФ		

б

Рис. 2. Измеренные и смоделированные частотные зависимости S-параметров mHEMT-транзистора при V_{ds} = 4 В, V_{gs} = –0,97 В (диапазон частот 1–40 ГГц) – *а*; *б* – значения элементов эквивалентной схемы

Основываясь на частотной независимости внутренних элементов и на том факте, что выражения (1) – (7) справедливы во всем частотном диапазоне, можно сформулировать дополнительную целевую функцию – минимум среднеквадратического отклонения значений внутренних элементов от постоянных значений [5]. Оптимизируемыми величинами являются внешние элементы L_g, L_s, L_d, R_g, R_s, R_d. Границы оптимизируемых величин определяются как x–30% и x+30%, где x – найденное ранее (начальное) значение внешнего элемента. При этом внутренние элементы зависят от величин внешних элементов.

Экспериментальное исследование. Для проверки представленной методики была восстановлена малосигнальная эквивалентная схема 0,13 мкм GaAs mHEMT-транзистора с шириной затвора 4×60 мкм, изготовленного по технологии Института СВЧ полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН, г. Москва). В качестве исходных данных использовались результаты зондовых измерений на пластине S-параметров транзистора при V_{ds} = 4 В, V_{gs} = –0,97 В в диапазоне частот от 1 до 40 ГГц.

Сравнение измеренных и рассчитанных по модели частотных характеристик S-параметров (рис. 2), а также частотная независимость внутренних элементов транзистора (рис. 3) подтверждают хорошую точность предложенной методики экстракции малосигнальной модели.

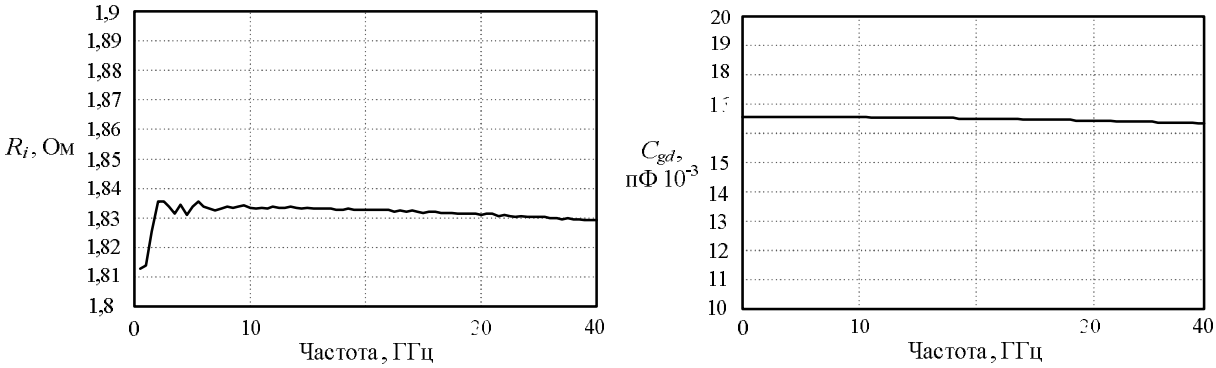


Рис. 3. Частотные зависимости значений внутренних элементов ЭС

Заключение. Предложенная методика была применена для восстановления малосигнальной модели СВЧ полевых транзисторов различных типов и разных производителей (НИИПП, НПФ «Микран», ИСВЧПЭ, OMMIC), изготовленных по различным монолитным технологиям (GaAs MESFET, pHEMT и mHEMT). Значения элементов малосигнальных моделей определялись при различных напряжениях смещения и использовались для построения нелинейных моделей транзисторов. Полученные результаты позволяют заключить, что методика весьма надежна и позволяет точно производить экстракцию всех внутренних элементов эквивалентной схемы, включая R_i и τ (при условии малой погрешности измерений).

Работа выполнялась при поддержке РФФИ в рамках проектов 08-07-99034-р_офи и 09-07-99020-р_офи, а также в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по направлениям «Нанотехнологии и наноматериалы», «Создание электронной компонентной базы», «Микроэлектроника» (мероприятия 1.1, 1.2.1, 1.2.2, 1.3.1 и 1.3.2, государственные контракты П1418, П1492, П2188, П669, П499, 16.740.11.0092 и 14.740.11.0135).

Литература

1. Man-Young J. A Technique for Extracting Small-Signal Equivalent-Circuit Elements of HEMTs / J. Man-Young et al. // IEICE Trans. Electron. – 1999. – Vol. E82-C, № 11. – P. 1968–1976.

2. Dambrine G. A New Method for Determining the FET Small-Signal Equivalent Circuit / G. Dambrine, A. Cappy, F. Heliodore, E. Playez // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 1988. – Vol. 36, № 7. – P. 1151–1159.

3. Berroth M. Broad-Band Determination of the FET Small-Signal Equivalent Circuit / M. Berroth, R. Bosch // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 1990. – Vol. 38, № 7. – P. 891–895.

4. Shirakawa K. An Approach to Determining an Equivalent Circuit for HEMT's / K. Shirakawa et al. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 1995. – Vol. 43, № 3. – P. 499–503.

5. Ban L.O. Analytical Extraction of Extrinsic and Intrinsic FET parameters / L.O. Ban, Z. Zhong, L. Mook-Seng // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 2009. – Vol. 57, № 57. – P. 254–261.

6. Vector Network Analyzer R&S ZVA40 Specifications. Version 02.02, September. – 2006. – 236 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.metrictest.com/catalog/pdfs/product_pdfs/rs_zva.pdf, свободный (дата обращения: 12.11.2010).

Коколов Андрей Александрович
Мл. науч. сотрудник каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа
Тел.: +7-923-405-93-59
Эл. почта: kokolovaa@gmail.com

Бабак Леонид Иванович
Канд. техн. наук, зам. директора НОЦ «Нанотехнологии», доцент каф. КСУП ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: leonid.babak@rambler.ru

Kokolov A.A., Babak L.I.
A technique for extraction of HEMT small signal model

The paper describes a new technique for extraction of HEMT small signal equivalent circuit based on measured *S*-parameters. The technique is used for extracting a model for microwave transistor produced with 0,13 μm GaAs mHEMT technology.
Keywords: microwaves, MMIC, HEMT, small signal model, extraction.