

Универсальный алгоритм построения линейной модели GaAs рНЕМТ СВЧ-транзистора для усилительных применений

В.И. Степанов, А.А. Попов, А.С. Сальников

Лаборатория автоматизации разработки микроэлектронных устройств "50ohm Lab",
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск,
stepanov.v.327@e.tusur.ru

Аннотация — Представлен универсальный алгоритм, позволяющий производить построение линейной модели GaAs рНЕМТ СВЧ-транзистора с общим истоком, предназначенной для дальнейшего применения в проектировании и моделировании СВЧ монолитных интегральных схем. Алгоритм представляет из себя комбинацию различных методик экстракции паразитных параметров GaAs рНЕМТ СВЧ-транзистора и позволяет выполнять построение линейных моделей транзисторов, изготовленных на различных предприятиях с варьируемой общей шириной затвора. Ошибка моделирования параметров рассеяния для построенных моделей не превышает 10%.

Ключевые слова — GaAs рНЕМТ, линейная модель, экстракция паразитных параметров, эквивалентная схема, алгоритм автоматизации, «холодный» режим.

I. ВВЕДЕНИЕ

A. Актуальность построения точных моделей

Потребность в качественных и более компактных СВЧ монолитных интегральных микросхемах растет с каждым годом. В связи с этим растет необходимость точного моделирования всех элементов схемы, в особенности транзисторов. Псевдоморфные транзисторы с высокой подвижностью электронов (рНЕМТ) играют важную роль в современной микро- и нанозлектронике за счет своего быстродействия, в связи с чем также растет и спрос на более точные модели, способные воспроизводить параметры реальных транзисторов в системах автоматизированного проектирования. Это достигается за счет учета множества эффектов, проявляющихся как на постоянном токе, так и на СВЧ.

B. Обзор методик построения линейной модели

Существует множество различных методик построения линейной модели рНЕМТ с общим истоком, основами для которых являются малосигнальные эквивалентные схемы (ЭС) в нескольких режимах работы:

- 1) Малосигнальная ЭС рНЕМТ транзистора в рабочей точке, при заданном смещении сток-исток и затвор-исток (см. рис. 1,а [1]).
- 2) Малосигнальная ЭС рНЕМТ транзистора в «холодном» режиме при нулевом напряжении сток-исток (см. рис. 1,б).

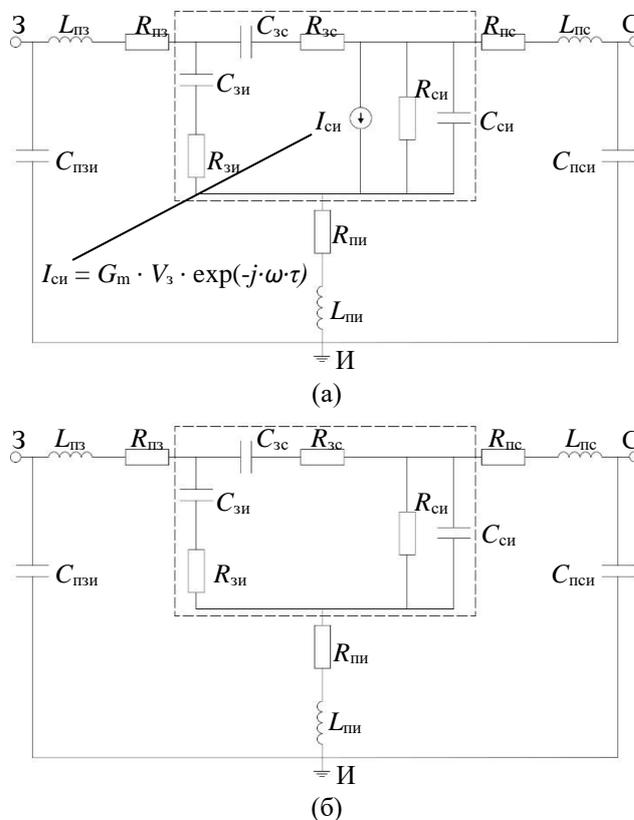


Рис. 1. Малосигнальные ЭС рНЕМТ транзистора, подключенного по схеме с общим истоком: а) в рабочей точке; б) в «холодном» режиме

ЭС транзистора в рабочей точке учитывает, как паразитные индуктивности и сопротивления ($L_{гз}$, $R_{гз}$, $L_{пс}$, $R_{пс}$, $L_{пи}$, $R_{пи}$), так и паразитные ёмкости электродов на землю ($C_{пзи}$, $C_{пси}$). В процессе экстракции ЭС транзистора в рабочей точке используется для определения элементов внутреннего транзистора, обведенного штриховой линией. Элементы внутреннего транзистора ($C_{зи}$, $C_{зс}$, $C_{си}$, $R_{зи}$, $R_{зс}$, $R_{си}$, G_m , τ) предназначены для моделирования линейного режима работы прибора в окрестности рабочей точки. Внутренний источник тока, управляемый напряжением, характеризуется крутизной G_m и фазовой задержкой τ [2]. ЭС в «холодном» режиме используется для экстракции паразитных элементов. «Холодный» режим работы подразумевает нулевое напряжение между

стоком и истоком транзистора, в связи с чем, в такой схеме отсутствует внутренний источник тока $I_{си}$. Все элементы внутреннего транзистора зависят от приложенных напряжений сток-исток и затвор-исток. На практике значения внутренних элементов ЭС определяют в разных частотных диапазонах [3].

В некоторых методиках пренебрегают сопротивлением $R_{зс}$, так как при отсутствии токов утечки его значение близко к нулю [3], [4]. Однако для более точного построения модели необходим учет сопротивления затвор-сток. Процедура экстракции элементов внутреннего транзистора приведена в статье [5]. Экстракция производится с использованием измеренных S -параметров транзистора в рабочей точке, из которых предварительно необходимо исключить влияние паразитных элементов по алгоритму, представленному в статье [6]. Расчет элементов внутреннего транзистора производят в соответствии с ЭС, изображенной на рис. 2.

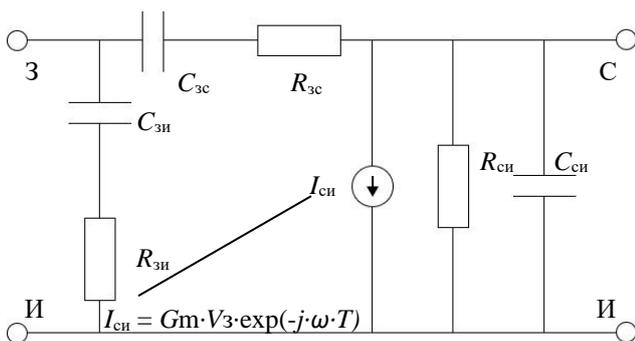


Рис. 2. ЭС внутреннего транзистора

Процедура экстракции паразитных элементов ЭС является важным этапом построения линейной модели СВЧ-транзистора. Если значения паразитных элементов будут определены неверно, то внутренние параметры транзистора также будут рассчитаны с ошибкой, что негативно отразится на точности линейной модели.

В наиболее простом случае для экстракции паразитных элементов используются измеренные S -параметры тестовых структур и соответствующие конфигурации ЭС (см. рис. 3). В данном варианте паразитные емкости представлены в виде П-образной схемы (см. рис. 3,а) для удобной их экстракции из измеренных Y -параметров холостого тестовой структуры. Паразитные индуктивности и сопротивления представлены в виде Т-образной схемы (см. рис. 3,б), что позволяет произвести экстракцию индуктивностей из мнимой части Z -параметров, а сопротивлений из действительной части Z -параметров короткозамкнутой тестовой структуры. Y и Z -параметры получают путём пересчёта измеренных S -параметров тестовых структур с использованием известных соотношений. Экстракция паразитных элементов ЭС с использованием тестовых структур считается одним из наиболее точных методов. Основное ограничение данного метода заключается в том, что его применение позволяет получить линейную

модель транзистора, способную воспроизводить S -параметры прибора только в плоскостях контактных площадок, в то время как для проектирования монолитных интегральных схем требуются модели, в которых влияние контактных площадок и подводящих линий полностью исключено.

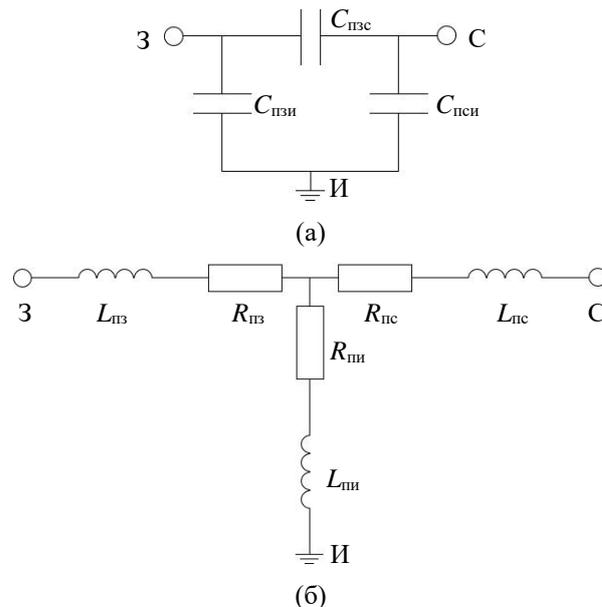


Рис. 3. ЭС для экстракции паразитных элементов: а) паразитных емкостей; б) паразитных индуктивностей и сопротивлений

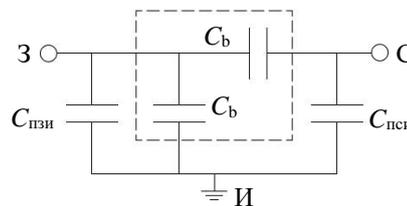


Рис. 4. ЭС для экстракции паразитных емкостей по методу Дамбрина

Для построения линейных моделей в плоскостях транзистора используют измеренные S -параметры, из которых предварительно исключается влияние контактных площадок и подводящих линий. Наиболее распространённые методы экстракции паразитных элементов ЭС основаны на использовании измеренных S -параметров транзистора в «холодных» режимах. Один из таких методов экстракции паразитных емкостей был предложен Дамбрином [7]. В данной методике два идентичных конденсатора C_b использовались для изображения емкостей, обусловленных областью пространственного заряда барьера Шоттки (см. рис. 4). При этом экстракция производится из мнимой части Y -параметров с вычитанием паразитных индуктивностей и сопротивлений. Основное ограничение данного метода связано с тем, что в ЭС используются одинаковые ёмкости C_b . В некоторых случаях данный подход может привести к переоценке емкости $C_{пзи}$, и как следствие отрицательной емкости $C_{пси}$, что ставит под сомнение универсальность данного метода [1].

В статье [8] Уайтом было предложено решение, призванное устранить основное ограничение метода Дамбринна за счет использования дополнительной емкости C_b (см. рис. 5). Уайт предположил, что ЭС транзистора в холодном режиме при напряжении на затворе меньше напряжения отсечки должна быть симметричной.

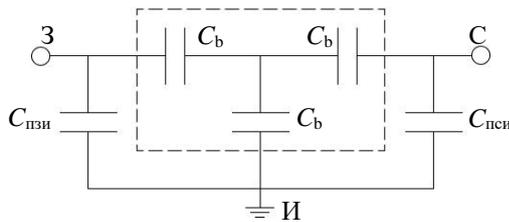


Рис. 5. ЭС для экстракции паразитных емкостей по методу Уайта

Однако предложенный метод обладал тем же недостатком – все три емкости области обеднения были равными, что в некоторых случаях приводило к расчёту отрицательного значения ёмкости $C_пси$ [1].

Также методика экстракции паразитных емкостей была предложена в работе [5]. В данном методе Тайрани предложил конфигурацию ЭС, в которой учитывается емкость $C_{си}$ (см. рис. 6). При этом перед экстракцией производят вычитание определённых ранее паразитных индуктивностей и сопротивлений, а соотношения между емкостями определяются весовым коэффициентом, который выбирается из условия минимальной ошибки расчёта S -параметров. Важно отметить, что автором был выбран коэффициент ($C_{пси} = 0,25C_{си}$), что является обоснованным выбором, так как $C_{си}$ не может быть равным C_b [9].

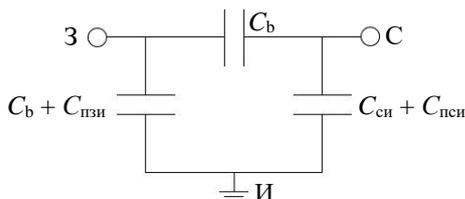


Рис. 6. ЭС для экстракции паразитных емкостей с использованием весового коэффициента

Преимуществом данной методики является возможность автоматизации подбора весового коэффициента, а также дополнительный учет емкости $C_{си}$, что позволяет минимизировать ошибку, однако в таком случае существует проблема неточной экстракции паразитных индуктивностей и сопротивлений.

Проблема экстракции паразитных индуктивностей и сопротивлений рассмотрена в статьях [2], [10]. В данных методиках предполагается, что при «холодном» режиме и нулевом или минимальном отрицательном смещении на затворе во внутренней части транзистора преобладает емкостной характер, поэтому необходимо учитывать внутренние емкости $C_з$, $C_с$, $C_{и}$. В таком случае можно представить ЭС в виде T-схемы, изображенной на рис. 7, а для расчета значений

паразитных индуктивностей и сопротивлений применяется метод линейной регрессии. Стоит учесть, что метод линейной регрессии является наиболее чувствительным к выбранному частотному диапазону. Из-за неточного извлечения паразитных емкостей зависимость мнимой части Z -параметров от квадрата частоты может иметь нелинейный характер и некорректно выбранный частотный диапазон может привести к расчёту отрицательных значений индуктивностей.

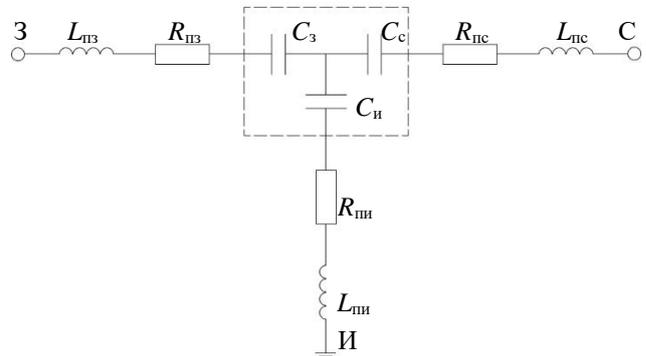


Рис. 7. ЭС для экстракции паразитных индуктивностей и сопротивлений с учетом емкостей внутреннего транзистора

Недостатком данного метода является сильная зависимость получаемых паразитных параметров от выбранного частотного диапазона, для которого применяется метод линейной регрессии.

Таким образом, на основе изученной литературы был сделан вывод о большом разнообразии методик экстракции паразитных параметров ЭС линейной модели GaAs pHEMT. Каждая из рассмотренных методик имеет преимущества и ограничения и не позволяет производить построение точных линейных моделей GaAs pHEMT вне зависимости от технологии изготовления. Цель данной работы – реализовать алгоритм экстракции параметров ЭС, позволяющий получать точные линейные модели СВЧ-транзисторов, изготовленных на разных фабриках и имеющих различные геометрические параметры.

II. ПРОЦЕДУРА ЭКСТРАКЦИИ

A. Методика экстракции паразитных элементов

В качестве ЭС для экстракции паразитных параметров был выбран вариант, предложенный Тайрани, однако экстракция паразитных емкостей производится при помощи метода линейной регрессии из мнимой части Y -параметров, измеренных в «холодном» режиме и при напряжении на затворе меньше напряжения отсечки. Выражения для применения линейной регрессии имеют следующий вид:

$$\text{Im}(Y_{12}) = -C_b \cdot \omega,$$

$$\text{Im}(Y_{11}) = (C_{пзи} + 2 \cdot C_b) \cdot \omega,$$

$$\text{Im}(Y_{22}) = (5 \cdot C_{пси} + C_b) \cdot \omega.$$

Для экстракции паразитных емкостей будет использован диапазон частот до 1 ГГц, так как в данном диапазоне измеренные малосигнальные Y -параметры транзистора имеют емкостной характер.

Для экстракции паразитных индуктивностей и сопротивлений воспользуемся ЭС с учетом емкостей внутреннего транзистора. В таком случае уравнения для экстракции паразитных индуктивностей из мнимой части Z -параметров методом линейной регрессии принимают вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(Z_{12}) \cdot \omega &= \omega^2 \cdot L_n - \frac{1}{C_n}, \\ (\operatorname{Im}(Z_{11}) - \operatorname{Im}(Z_{12})) \cdot \omega &= \omega^2 \cdot L_3 - \frac{1}{C_3}, \\ (\operatorname{Im}(Z_{22}) - \operatorname{Im}(Z_{12})) \cdot \omega &= \omega^2 \cdot L_c - \frac{1}{C_c}. \end{aligned}$$

Экстракция паразитных индуктивностей L_3 и L_c производится в диапазоне высоких частот от 6 до 20 ГГц, где наиболее выражено проявляется индуктивная составляющая, L_n же экстрагируется из диапазона до 16 ГГц, что связано с тем, что в некоторых случаях зависимость $\operatorname{Im}(Z_{12})$ от ω^2 имеет нелинейный характер.

Для экстракции паразитных сопротивлений методом линейной регрессии необходимо домножить действительную часть Z -параметров на циклическую частоту, в таком случае уравнения для линейной регрессии выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(Z_{12}) \cdot \omega &= R_n \cdot \omega, \\ (\operatorname{Re}(Z_{11}) - \operatorname{Re}(Z_{12})) \cdot \omega &= R_3 \cdot \omega, \\ (\operatorname{Re}(Z_{22}) - \operatorname{Re}(Z_{12})) \cdot \omega &= R_c \cdot \omega. \end{aligned}$$

Для экстракции паразитных сопротивлений R_3 и R_n используется диапазон частот от 10 до 20 ГГц, так как зависимости в целом линейны, однако на низких частотах проявляется нелинейный характер. Для экстракции R_c используется диапазон частот до 7 ГГц, так как на высоких частотах заметен нелинейный характер зависимости.

Важно заметить, что данные диапазоны частот для экстракции выбраны эмпирически, исходя из измеренных данных GaAs рНЕМТ транзисторов различных предприятий; в случаях построения моделей отдельных транзисторов возможны иные диапазоны, позволяющие производить более точную экстракцию паразитных индуктивностей и сопротивлений.

В. Экстракция элементов внутреннего транзистора

Для экстракции элементов внутреннего транзистора используется ЭС, изображенная на рис. 2, учитывающая сопротивление R_{3c} . Предварительно из измеренных S -параметров транзистора в рабочей точке исключается влияние экстрагированных паразитных элементов. Внутренние элементы ЭС рассчитываются по следующим формулам:

$$R_{cн} = \frac{1}{\operatorname{Re}(Y_{12} + Y_{22})}, \quad C_{cн} = \frac{\operatorname{Im}(Y_{12} + Y_{22})}{\omega},$$

$$\begin{aligned} G_m &= \left| \frac{(Y_{12} - Y_{21}) \cdot (Y_{11} + Y_{12})}{\operatorname{Im}(Y_{11} + Y_{12})} \right|, \\ \tau &= \frac{\frac{\pi}{2} - \operatorname{Arg}(Y_{12} - Y_{21}) + \operatorname{Arg}(Y_{11} + Y_{12})}{\omega}, \\ R_{3c} &= -\operatorname{Re}\left(\frac{1}{Y_{12}}\right), \\ C_{3c} &= \frac{1}{\omega \cdot \operatorname{Im}\left(\frac{1}{Y_{12}}\right)}, \\ R_{3и} &= \operatorname{Re}\left(\frac{1}{Y_{11} + Y_{12}}\right), \\ C_{3и} &= -\frac{1}{\omega \cdot \operatorname{Im}\left(\frac{1}{Y_{11} + Y_{12}}\right)}. \end{aligned}$$

Для определения значения внутреннего параметра ЭС используется медиана, поскольку результаты измерений могут содержать выбросы. Медиана применяется также к определенным частотным диапазонам, в которых рассчитанные значения внутренних параметров практически не зависят от частоты: $R_{cн}$ экстрагируется из частотного диапазона от 13 до 20 ГГц; параметры τ , R_{3c} и $R_{3и}$ определяются из частотного диапазона от 1 ГГц; G_m экстрагируется из диапазона от 3,5 до 4,5 ГГц; ёмкости $C_{3и}$, $C_{cн}$, C_{3c} экстрагируются из диапазона частот от 16 ГГц.

После экстракции всех элементов ЭС малосигнальной модели производится оптимизация по алгоритму Левенберга–Марквардта [11] для окончательной минимизации средней ошибки повторения S -параметров.

С. Алгоритм построения модели

На рис. 8 представлена диаграмма, поясняющая реализованный алгоритм построения линейной модели, состоящий из 6 этапов.



Рис. 8. Алгоритм построения линейной СВЧ модели GaAs рНЕМТ

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для экспериментальной проверки методики были построены линейные модели GaAs рНЕМТ СВЧ-транзисторов, изготовленных на 3 разных фабриках и с разной общей шириной затвора. Параметры транзисторов и условия измерения представлены в табл. 1.

Параметры транзисторов и режимы измерения S-параметров

Номер фабрики	Параметры транзисторов		Условия измерения			
	Техпроцесс, мкм	Общая ширина затвора, мкм	$V_{зи}$, В	$V_{си}$, В	$I_{си}$, мА	Диапазон частот, ГГц
1	0,15	4x40	4.0	-0,735	15	0,01...50
2	0,15	4x50	3,019	-0,496	10,03	0,1...50
3	0,5	4x75	-0,2	3	—	0,1...20

Сравнение рассчитанных и измеренных S-параметров представлено на рис. 9. Значения ошибки моделирования S-параметров представлены в табл. 2.

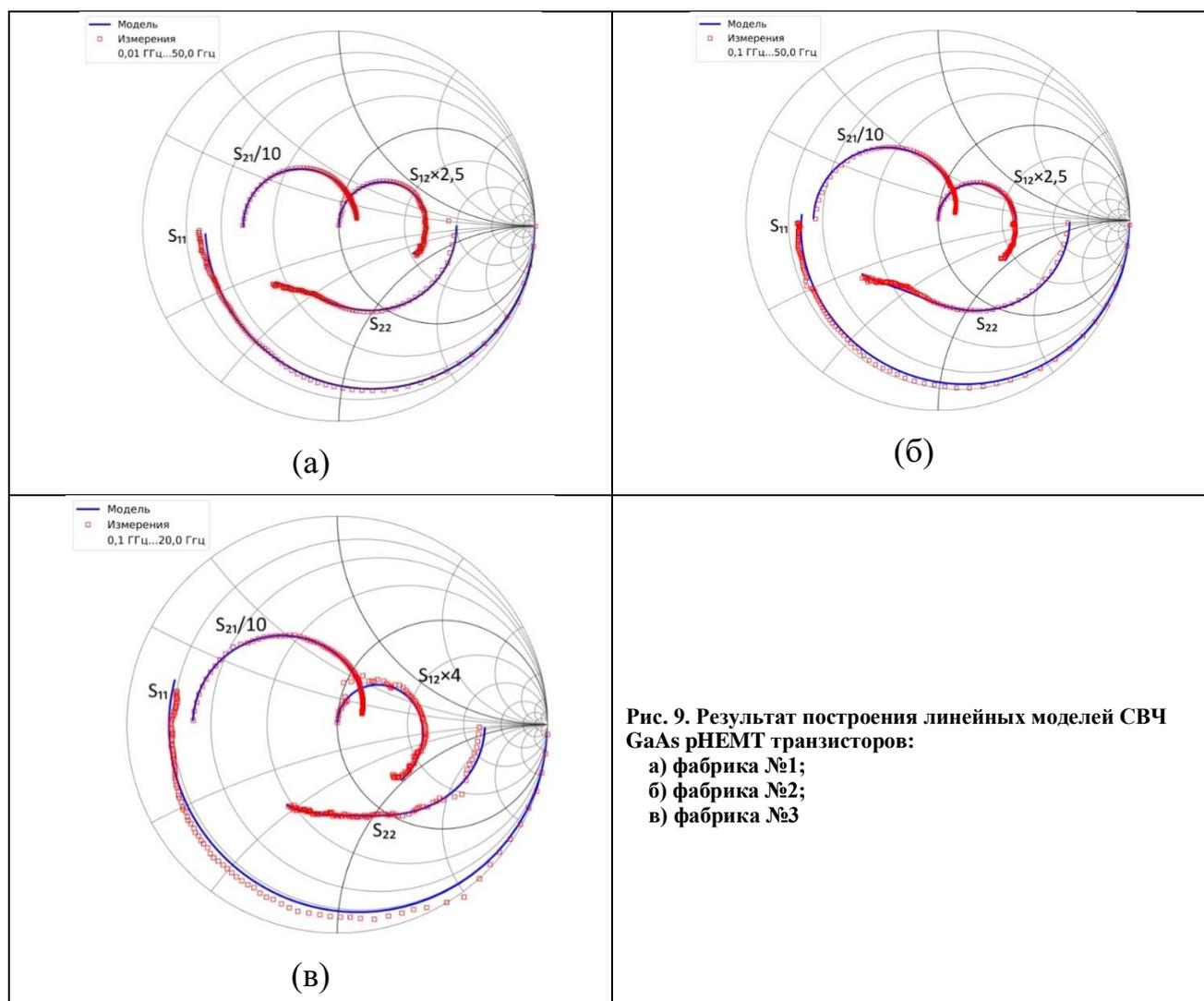


Таблица 2

Ошибка моделирования S-параметров

Номер фабрики	RMS, %				Средняя ошибка, %
	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}	
№1	2,2	5,2	3,6	2,4	3,35
№2	3,9	2,9	2,6	3,9	3,325
№3	3,6	10,8	1,9	2,4	4,675

Малая ошибка моделирования S-параметров свидетельствует о качественном выборе комбинации методик экстракции паразитных элементов линейной модели GaAs pHEMT транзистора и корректных частотных диапазонах для применения линейной регрессии и медианы.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье на основе проведённого обзора методик экстракции элементов ЭС линейной модели pHEMT СВЧ-транзистора был разработан универсальный алгоритм, реализующий комбинацию различных методов экстракции паразитных и внутренних элементов малосигнальной эквивалентной схемы. Данный алгоритм предназначен для построения линейной модели GaAs pHEMT СВЧ-транзисторов, изготовленных на различных предприятиях и с варьируемой общей шириной затвора. При использовании предложенного алгоритма средняя ошибка моделирования S-параметров составила не более 10%. Следовательно, построенные модели могут использоваться в практических целях для проектирования и моделирования СВЧ МИС.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Extraction Method for Parasitic Capacitances and Inductances of HEMT Models / H. Zhang [et. al.] // Solid-State Electronics. – 2017. – Vol. 129. – P. 108-113.

[2] Qian, F. Small Signal Equivalent Circuit Modeling for AlGaIn/GaN HFET: Hybrid Extraction Method for Determining Circuit Elements of AlGaIn/GaN HFET / F. Qian, J. H. Leach, H. Morkoc // Proceedings of the IEEE. – 2010. – Vol. 98. – No 7. – P. 1140-1150.

[3] Kompa, G. Highly Consistent FET Model Parameter Extraction Based on Broadband S-Parameter Measurement / G. Kompa, M. Novotny // IEEE Microwave Symposium Digest MTT-S. – 1992. – P. 293-296.

[4] A new and reliable direct parasitic extraction method for MESFETs and HEMTs / R. Tayrani [et. al.] // 23rd European Microwave Conference. – 1993. – P. 451-453.

[5] Accurate small-signal modeling of HFET's for millimeter-wave applications / N. Rorsman [et. al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1996. – Vol. 44. – No 3. – P. 432-437.

[6] Small Signal Modelling of Novel InGaAs/InAlAs/InP pHEMT for High Frequency Applications / O. J. Xian [et. al.] // 3rd International Conference on Electronic Design (ICED). – 2016. – P. 23-28.

[7] A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit / G. Dambrine [et. al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1988. – Vol. 36. – No 7. – P. 1151-1159.

[8] White, P. M. Improved equivalent circuit for determination of MESFET and HEMT parasitic capacitances from 'Coldfet' measurements / P. M. White, R. M. Healy // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. – 1993. – Vol. 3. – No 12. – P. 453-454.

[9] A Comparative Study on the Parasitic Parameter Extraction Techniques for the Small-Signal Microwave Phemt Modeling / A. A. Popov [et. al.] // XIII International scientific and technical conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics). – 2019.

[10] Masar, M. Fast and accurate method for small-signal fet equivalent circuit identification / M. Masar, M. M. Tomaka, M. Klasovity // Proceedings of the International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and System (MIXDES). – 2006. – P. 475-479.

[11] Пензин, К. В. Вариант алгоритма Левенберга–Марквардта решения нелинейной задачи наименьших квадратов / К. В. Пензин // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1991. – Т. 31. – № 10. – С. 1444-1451.

A Universal Algorithm for Amplifier Oriented Linear GaAs pHEMT

V.I. Stepanov, A.A. Popov, A.S. Salnikov

50ohm Lab, Tomsk state university of control systems and radioelectronics, Tomsk, Russia,
stepanov.v.327@e.tusur.ru

Abstract — Purpose of this paper is to derive a universal algorithm for automatic parameter extraction of common source GaAs pHEMT small-signal equivalent circuit using the appropriate combination of the existing modeling techniques. The resulting algorithm should be applicable to GaAs pHEMTs of various total gate width, manufactured in different fabs even with different process nodes.

Methods: linear analysis of equivalent circuits for several modes of GaAs pHEMT operation; processing of measured S-parameters of several GaAs pHEMTs manufactured in different fabs; linear regression.

Results. The following combination of parameter extraction techniques was found to build an accurate small-signal model:

extrinsic capacitances obtained using the pinched-off cold mode S-parameters with empirical partitioning coefficient, extrinsic inductances and resistances are extracted from the unbiased cold mode S-parameters using the equivalent circuit with intrinsic capacitances and all intrinsic parameters are calculated from the S-parameters measured at desired bias point using the equivalent circuit with gate-drain resistance. The combination of techniques was tested on data measured on pHEMTs with various total gate width were which manufactured in three different fabs. The average S-parameters modeling error was less than 10%.

Discussion. Developed parameter extraction algorithm can be applied to build small-signal models of GaAs pHEMTs of different total gate width, manufactured in different fabs. The resulting models are accurate enough for practical purposes such as MMIC design.

Keywords — GaAs pHEMT, linear model, parasitic parameter extraction, equivalent circuit, automation algorithm, cold FET.

REFERENCES

- [1] Extraction Method for Parasitic Capacitances and Inductances of HEMT Models / H. Zhang [et. al.] // Solid-State Electronics. – 2017. – Vol. 129. – P. 108-113.
- [2] Qian, F. Small Signal Equivalent Circuit Modeling for AlGaIn/GaN HFET: Hybrid Extraction Method for Determining Circuit Elements of AlGaIn/GaN HFET / F. Qian, J. H. Leach, H. Morkoc // Proceedings of the IEEE. – 2010. – Vol. 98. – No 7. – P. 1140-1150.
- [3] Kompa, G. Highly Consistent FET Model Parameter Extraction Based on Broadband S-Parameter Measurement / G. Kompa, M. Novotny // IEEE Microwave Symposium Digest MTT-S. – 1992. – P. 293-296.
- [4] A new and reliable direct parasitic extraction method for MESFETs and HEMTs / R. Tayrani [et. al.] // 23rd European Microwave Conference. – 1993. – P. 451-453.
- [5] Accurate small-signal modeling of HFET's for millimeter-wave applications / N. Rorsman [et. al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1996. – Vol. 44. – No 3. – P. 432-437.
- [6] Small Signal Modelling of Novel InGaAs/InAlAs/InP pHEMT for High Frequency Applications / O. J. Xian [et. al.] // 3rd International Conference on Electronic Design (ICED). – 2016. – P. 23-28.
- [7] A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit / G. Dambrine [et. al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1988. – Vol. 36. – No 7. – P. 1151-1159.
- [8] White, P. M. Improved equivalent circuit for determination of MESFET and HEMT parasitic capacitances from 'Coldfet' measurements / P. M. White, R. M. Healy // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. – 1993. – Vol. 3. – No 12. – P. 453-454.
- [9] A Comparative Study on the Parasitic Parameter Extraction Techniques for the Small-Signal Microwave PHEMT Modeling / A. A. Popov [et. al.] // XIII International scientific and technical conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics). – 2019.
- [10] Masar, M. Fast and accurate method for small-signal fet equivalent circuit identification / M. Masar, M. M. Tomaka, M. Klasovity // Proceedings of the International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and System (MIXDES). – 2006. – P. 475-479.
- [11] Penzin, K. V. Variant algoritma Levenberga–Markvardta reshenija nelinejnoj zadachi naimen'shij kvadratov (A variant of the Levenberg – Marquardt algorithm for solving the nonlinear least squares problem) / K. V. Penzin // Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki. – 1991. – T. 31. – № 10. – S. 1444-1451 (in Russian).