

УДК 621.382.323

А.А. Коколов, Л.И. Бабак

Методика построения нелинейной модели ЕЕНЕМТ для гетероструктурных полевых СВЧ-транзисторов

Описывается методика построения нелинейной модели ЕЕНЕМТ для гетероструктурных (НЕМТ) полевых СВЧ-транзисторов без использования дорогого программного обеспечения. Рассматриваются основные этапы построения модели, включая определение ее параметров на постоянном и переменном токе. При использовании методики для 0,3 мкм GaAs рНЕМТ-транзистора, изготовленного по отечественной технологии, достигнуто хорошее совпадение результатов моделирования и эксперимента.

Ключевые слова: СВЧ-транзистор, нелинейная модель, монолитные интегральные схемы.

Введение. При проектировании СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) на основе гетероструктурных НЕМТ (рНЕМТ, mНЕМТ) технологий одной из важнейших проблем является точное моделирование СВЧ-транзисторов. Для МИС миллиметрового диапазона волн дополнительные сложности возникают в связи с необходимостью использования неквазистатических нелинейных моделей транзисторов (т.е. моделей «с памятью»), точного учета паразитных параметров и т.д.

Нелинейная модель ЕЕНЕМТ, разработанная компанией Agilent [1], специально предназначена для НЕМТ-транзисторов и в состоянии описать любую из имеющихся в них нелинейностей. Однако для экстракции таких моделей необходимо дорогое специализированное программное обеспечение, например Agilent IC-CAP. В настоящей работе предлагается методика построения модели ЕЕНЕМТ, не требующая использования дорогостоящих программных продуктов.

Процедура экстракции. На рис. 1 приведена нелинейная модель ЕЕНЕМТ гетероструктурного СВЧ-транзистора в форме эквивалентной схемы. Уравнения и список параметров модели представлены в [2, 3]. Все параметры модели ЕЕНЕМТ, а их 52, можно условно разделить на несколько групп: 1) параметры, отвечающие за характеристики на постоянном токе (V_{DSO} , V_{SAT} , GAMMA , GMMAX , КАРА , P_{Eff} и др.); 2) параметры, отвечающие за характеристики на переменном токе (GAMMAAC , GMMAXAC , КАРАAC , P_{EffAC} , C_{12SAT} , C_{DSO} и др.); 3) специальные параметры, отвечающие за физические явления в транзисторе (V_{BR} , КВК , R_{DB} , C_{BS} и др.); 4) параметры, определяющие паразитные элементы (R_G , R_D , R_S , L_G , L_D , L_S , C_{PG} , C_{PD}).

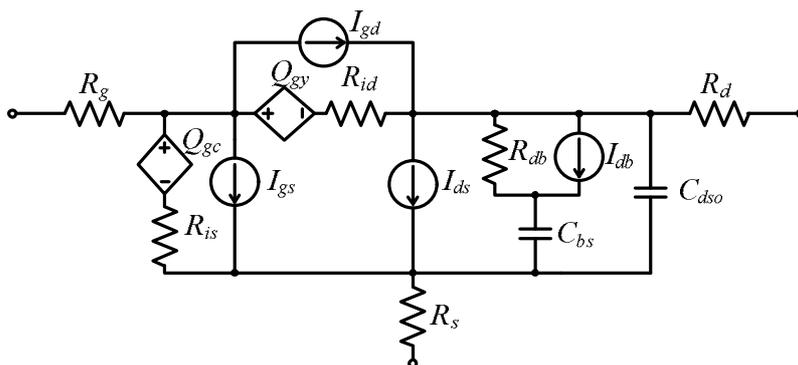


Рис. 1. Нелинейная модель ЕЕНЕМТ гетероструктурного СВЧ-транзистора

В [3] предложена методика экстракции формальных нелинейных моделей, подобных изображенной на рис. 1. Методика состоит из четырех этапов (рис. 2):

1) Экстракция линейных моделей по результатам малосигнальных СВЧ-измерений для заданного набора режимов (рабочих точек) по постоянному току.

2) Аппроксимация режимных зависимостей тока стока и внутренних элементов нелинейной модели аналитическими функциями.

3) Прямая оптимизация параметров нелинейной модели с целью наилучшего соответствия измеренных и смоделированных характеристик. Коэффициенты аппроксимирующих функций, полученные на предыдущем этапе, используются в качестве начального приближения.

4) Извлечение параметров, описывающих различные физические эффекты в транзисторе (пробой, тепловые эффекты и т.д.), на основе дополнительных измерений. Данные параметры устанавливаются вручную и не оптимизируются.



Рис. 2. Методика экстракции формальных нелинейных моделей СВЧ-транзисторов

Для того чтобы исключить влияние тепловых эффектов при измерениях ВАХ и S-параметров транзисторов, необходимо применение импульсных режимов измерений.

Для восстановления линейных моделей в различных рабочих точках и для экстракции значений паразитных элементов можно воспользоваться методикой, описанной в [4]. Самым трудоемким этапом построения нелинейной модели является аппроксимация полученных зависимостей внутренних элементов и тока стока аналитическими функциями модели. В случае с моделью ЕЕНЕМТ задачу можно упростить, вычислив значения некоторых ее параметров непосредственно из измерений [2]. Так, например, ряд коэффициентов модели определяются из зависимости крутизны на постоянном токе от напряжения на затворе.

Вычисленные параметры используются в качестве первого приближения при построении нелинейной модели ЕЕНЕМТ. На заключительном этапе выполняется более точный подбор или оптимизация параметров модели. При отсутствии оборудования для измерения специальных параметров модели эти коэффициенты также можно включить в оптимизируемые величины.

Экспериментальное исследование методики. Для проверки методики была построена нелинейная модель ЕЕНЕМТ для 0,3 мкм GaAs рНЕМТ-транзистора с шириной затвора 6×100 мкм (Т600), изготовленного по технологии НПФ «Микран».

При построении модели использовались следующие данные, измеренные в НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУРа:

1) S-параметры в диапазоне частот 100 МГц ... 40 ГГц для напряжений смещения $V_{gs} = -2...0,4$ В (шаг $\Delta V_{gs} = 0,4$ В), $V_{ds} = 0...8$ В (шаг $\Delta V_{ds} = 0,5$ В).

2) Выходные ВАХ транзистора в указанном выше диапазоне напряжений смещения.

3) Зависимость выходной мощности транзистора от входной в 50-омном тракте в рабочей точке $V_{gs} = -0,8$ В, $V_{ds} = 5$ В, $I_{ds} = 100$ мА на частоте 6 ГГц.

На рис. 3–5 представлены характеристики транзистора Т600, полученные из измерений и с использованием модели ЕЕНЕМТ в пакете Microwave Office: выходные ВАХ с учетом эффекта саморазогрева (см. рис. 3), частотные зависимости малосигнальных S-параметров в различных рабочих точках (см. рис. 4) и амплитудная характеристика на частоте 6 ГГц (см. рис. 5).

На рис. 6 показаны рассчитанные с помощью модели на частоте 6 ГГц формы тока и напряжения стока, а также нагрузочная линия транзистора при комплексной нагрузке $Z_H = (50 + j50)$ Ом.

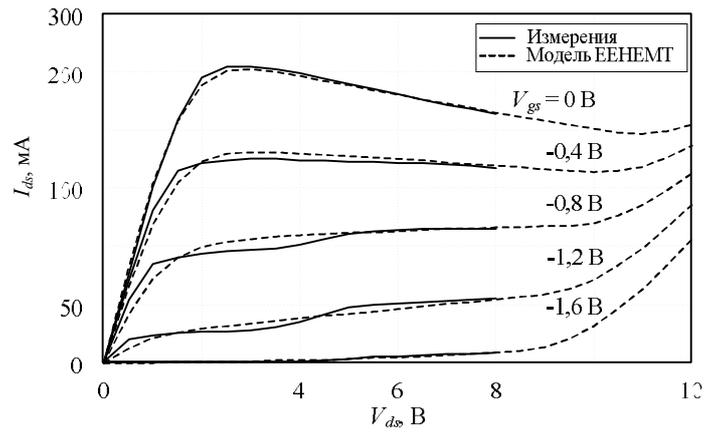


Рис. 3. Измеренные и смоделированные выходные ВАХ транзистора

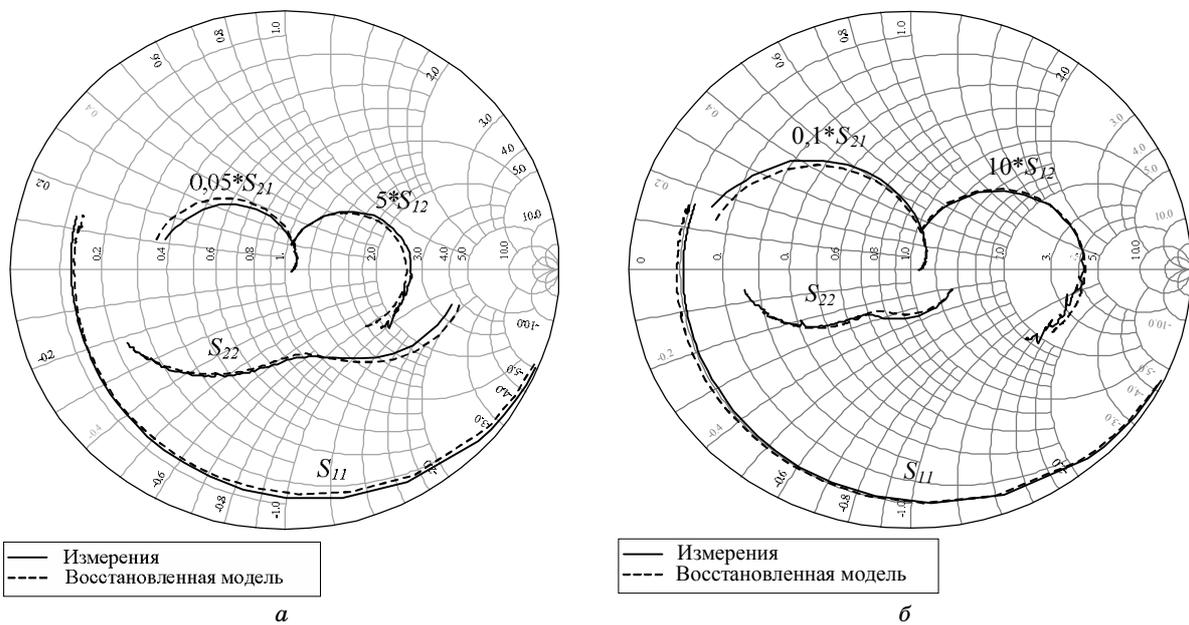


Рис. 4. Частотные зависимости малосигнальных S -параметров транзистора в диапазоне 0,5...40 ГГц при напряжениях: $a - V_{gs} = -1,2$ В, $V_{ds} = 4$ В ($I_{ds} = 33$ мА); $б - V_{gs} = -0,4$ В, $V_{ds} = 2,5$ В ($I_{ds} = 173$ мА)

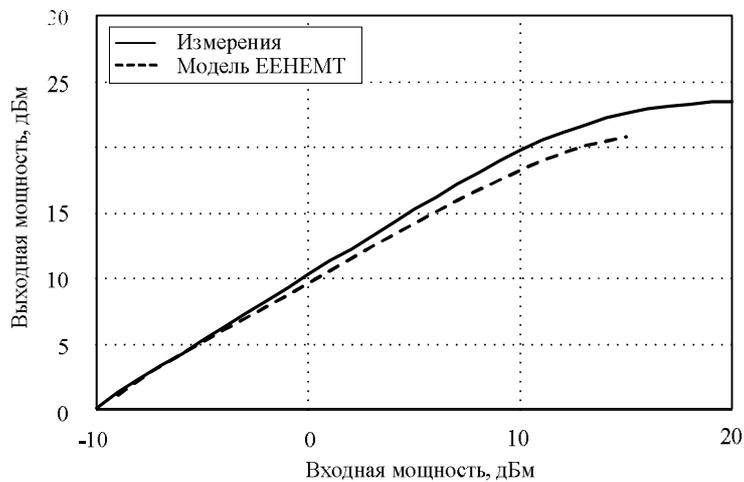


Рис. 5. Измеренная и смоделированная амплитудная характеристика транзистора (частота 6 ГГц; рабочая точка $V_{gs} = -0,8$ В, $V_{ds} = 5$ В, $I_{ds} = 100$ мА; нагрузка 50 Ом)

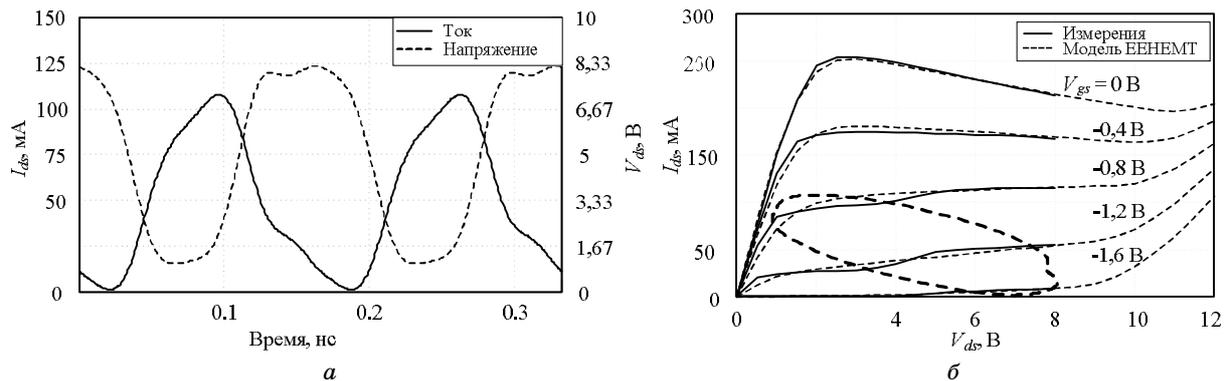


Рис. 6. Характеристики транзистора на частоте 6 ГГц при $P_{in} = 14$ дБм, $Z_H = (50 + j50)$ Ом в рабочей точке $V_{gs} = -0,8$ В, $V_{ds} = 5$ В ($I_{ds} = 110$ мА):
 а – формы тока и напряжения стока; б – ВАХ и нагрузочная линия

Заключение. Полученная нелинейная модель EEHEMT для GaAs pHEMT-транзистора T600 хорошо описывает его малосигнальные S-параметры в диапазоне частот до 40 ГГц при различных напряжениях смещения (ошибка не более 15%), выходные ВАХ и выходную мощность. Разработанная модель применима для разработки СВЧ радиоэлектронных устройств.

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. Сайт фирмы Agilent [Электронный ресурс]. – Режим доступа свободный: <http://www.home.agilent.com/>, (дата обращения: 12.11.2010).
2. Agilent-ADS EEHEMT Model Menu.
3. Chalermwisutkul D.S. Large Signal Modeling of GaNHEMTs for UMTS Base Station Power Amplifier Design Taking into Account Memory Effects / D.S. Chalermwisutkul // PhD Thesis. – Aachen, Germany: Aachen University, 2009. – P. 25–49.
4. Коколов А.А. Методика построения малосигнальной модели транзистора с высокой подвижностью электронов // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2(22), ч. 1. – С. 153–156.

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. тех. 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.

Extraction technique of nonlinear EEHEMT model for heterostructure microwave field-effect transistors

The paper describes an extraction technique of nonlinear EEHEMT model for heterostructure microwave field-effect transistors without using expensive extraction software. The main stages of model extraction including DC and AC parameter determination are considered. Simulated and measured characteristics of 0,3 μm GaAs pHEMT transistor were compared and satisfactory results were achieved.

Keywords: microwave transistor, nonlinear model, microwave monolithic integrated circuits.