

УДК 621.382.323

А.А. Коколов, Ф.И. Шеерман, Л.И. Бабак

## Обзор математических моделей СВЧ полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов

Приведены классификация и обзор моделей транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ). Описание типов моделей НЕМТ-транзисторов базируется на современной общей классификации моделей полупроводниковых приборов. Обзор предназначен для специалистов по проектированию СВЧ-устройств.

**Ключевые слова:** классификация, нелинейная модель, СВЧ-транзистор, НЕМТ.

**Введение.** Современный этап развития радиоэлектронных средств характеризуется все более широким внедрением в них СВЧ монолитных интегральных схем (МИС). Наиболее перспективными с точки зрения обеспечения качественных параметров СВЧ МИС являются гетероструктурные технологии, основанные на использовании сложных полупроводниковых соединений. При этом большое распространение получили технологии изготовления гетероструктурных СВЧ полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ – High Electron Mobility Transistor). В частности, псевдоморфные (pНЕМТ) и метаморфные (mНЕМТ) технологии на основе материала GaAs обеспечивают наилучший компромисс между стоимостью и характеристиками СВЧ МИС, гетероструктурные НЕМТ-технологии на основе InP позволяют получить высокие рабочие частоты (до сотен гигагерц) и очень низкий коэффициент шума, а на основе GaN – высокие пробивные напряжения и значительную выходную мощность МИС.

Разработка активных СВЧ-устройств значительно ускоряется и удешевляется при использовании систем автоматизированного проектирования (САПР). Однако для этого нужны соответствующие математические модели активных приборов, в частности НЕМТ-транзисторов, описывающие нелинейности, высокочастотный шум, саморазогрев и другие факторы.

В настоящее время существует большое количество моделей СВЧ полевых транзисторов, многие из которых применимы к транзисторам с высокой подвижностью электронов. Модели, получившие наибольшее распространение среди разработчиков СВЧ-устройств, интегрированы в современные САПР. Например, в программный пакет Microwave Office (версия 2008 г.) встроено 39 нелинейных моделей полевых транзисторов. Некоторые САПР допускают возможность использования моделей, написанных самим пользователем, либо на стандартном языке описания моделей Verilog, либо с использованием специального дополнительного программного продукта (SDK – Software Design Kit), который интегрирует написанную на языке C/C++ модель в программу моделирования. При таком разнообразии неудивительно, что перед разработчиком стоит проблема выбора наиболее подходящей для проектирования модели, которая бы с достаточной точностью отражала параметры рассеяния, нелинейные эффекты, шумы и т.п.

Целью настоящей работы являются обзор и классификация существующих моделей СВЧ полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов. Описание типов моделей НЕМТ-транзисторов базируется на общей классификации моделей полупроводниковых приборов, сложившейся в настоящее время в зарубежной и отечественной литературе применительно к проектированию как аналоговых, так и цифровых схем. В основе такой классификации лежит степень абстракции моделей, определяющая возможность их использования в САПР на различных уровнях моделирования приборов, устройств и систем. Так как в отечественных и иностранных источниках зачастую используются различные термины для определения одних и тех же понятий, в работе приводится взаимное соответствие этих терминов.

**Типы моделей.** Исследователи делят существующие математические модели полупроводниковых приборов на несколько групп, в зависимости от степени абстракции (рис. 1) [1, 2]:

1) Физико-технологические модели (отражают физические процессы, происходящие в полупроводнике, основаны на решении системы дифференциальных уравнений в частных производных).

2) Компактные, или структурные модели (характеризуют поведение прибора только относительно его внешних зажимов, но одновременно определенным образом отражают

внутреннюю структуру и физические процессы в приборе, в общем случае описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений).

3) Поведенческие, или бесструктурные модели (описывают связь выходных данных со входными с помощью математических функций, систем дифференциальных уравнений или специальных преобразований формальным образом, т.е. независимо от внутренней структуры и реальных процессов в приборе).

4) Аппаратные модели (строятся в виде специализированного устройства, в котором информация о модели отражена в структуре электрических связей между его электрическими блоками).



Рис. 1. Классификация математических моделей СВЧ полупроводниковых приборов

В данной работе аппаратные модели транзисторов не рассматриваются в силу нецелесообразности их применения для разработки СВЧ-устройств. Далее рассмотрен каждый из видов моделей более подробно.

**Физико-технологические модели.** В физико-технологических моделях при моделировании структуры транзистора решаются нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных, которые описывают распределение заряда, перенос заряда, непрерывность тока и т.д. При описании моделей учитываются геометрия прибора и физические свойства полупроводников, металлов и диэлектриков, которые формируют транзистор. Стоит отметить, что в связи с малыми размерами элементов моделируемого прибора должны быть учтены квантово-механические эффекты.

При моделировании геометрия транзистора разбивается на мелкие части в двумерном или трехмерном пространстве, а затем производится решение дифференциальных уравнений в частных производных и квантово-механических уравнений для каждой элементарной ячейки или узла структуры. Это требует использования сложных алгоритмов решения, таких, например, как метод конечных разностей и метод конечных элементов. Данные методы используются в коммерческих САПР ISE [3] и Silvaco [4].

Физико-технологические модели имеют ряд недостатков: процесс моделирования занимает много времени, а точность решения зависит от того, как хорошо вычислены физические свойства и размеры устройства, от выбранного численного метода решения системы уравнений и т.п.

Обычно физико-технологические модели не применяют для проектирования активных СВЧ-устройств. Однако данный подход к моделированию успешно применяется в технологическом цикле разработки для проектирования новых СВЧ-транзисторов – изменяя физические и геометрические свойства прибора, добиваются необходимых параметров на постоянном и переменном токе.

**Компактные модели.** Термин «компактная модель» (*compact model*) в настоящее время является общепризнанным в зарубежной литературе. Он не несет информации о сути или принципе построения модели, но зато характеризует основное требование к подобным моделям – требование вычислительной простоты (компактности). Главное отличительное свойство компактных моделей – это возможность применения в САПР для моделирования радиоэлектронных устройств на уровне электрических схем. При разработке компактной модели преодолевается противоречие между ее точностью и сложностью [2].

В случае проектирования активных СВЧ-устройств компактные модели полупроводниковых приборов, как правило, представляют собой модели в виде эквивалентных схем (ЭС). В отечественной литературе компактные модели часто называют электрическими моделями, указывая тем самым на их главное назначение – моделирование электрических цепей. Определенное распространение получил также термин «структурные модели», он подчеркивает, что модель некоторым образом отражает внутреннюю структуру и физические особенности исходного объекта, в отличие от так называемых «бесструктурных

моделей» [5]. В частности, ЭС СВЧ-транзистора на электрическом уровне описывает определенные свойства активной структуры (сопротивления и емкости переходов, усиленные свойства т.д.), а также паразитные емкости и индуктивности соединительных выводов.

Компактные модели принято делить на две разновидности, которые мы назовем компактными электрическими моделями и компактными физическими моделями. Компактные электрические модели описывают зависимости параметров прибора только от электрических переменных – например напряжений на зажимах транзистора. В компактных физических моделях отражается зависимость этих параметров и от физических (геометрических, технологических и т.д.) переменных.

Кроме того, компактные модели делят на линейные (малосигнальные) и нелинейные. Некоторые исследователи выделяют в отдельный класс также табличные модели.

*Малосигнальная модель* верна только для одного (заданного) режима по постоянному току, при этом предполагается, что изменения переменного тока и напряжения в окрестности рабочей точки сравнительно небольшие. Элементы линейной модели не зависят от амплитуды входного переменного напряжения и от частоты.

Наиболее общей и часто используемой электрической малосигнальной моделью СВЧ полевого транзистора является ЭС, изображенная на рис. 2. В зарубежной литературе она известна как обобщенная модель и является результатом анализа внутренней структуры полевого транзистора. Такая малосигнальная модель достаточно точно предсказывает поведение НЕМТ-транзистора в широком диапазоне частот от 1 до 62 ГГц [6].

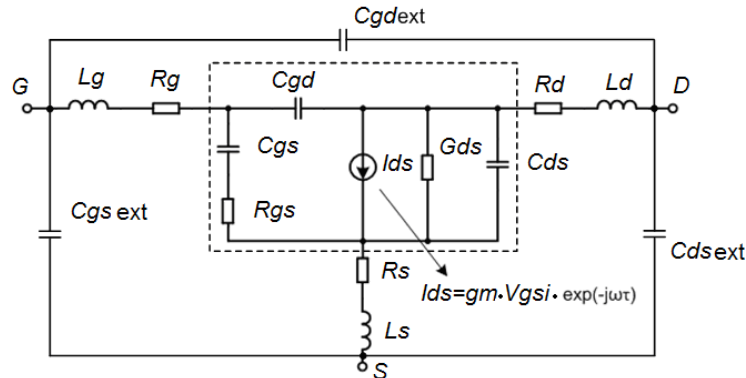


Рис. 2. Обобщенная малосигнальная модель СВЧ полевого транзистора

Существует множество методов экстракции (определения параметров) параметров малосигнальной модели [6–10]. Эти методы можно разделить на аналитические [8, 9], оптимизационные [6, 10] и комбинированные [7]. Аналитические методы требуют проведения дополнительных измерений в «холодном режиме», что может привести к деградации затвора [7]. При этом во многих работах отмечено неудовлетворительное совпадение измеренных и смоделированных  $S$ -параметров [10]. Значения элементов ЭС, 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 нелинейных моделях параметры элементов ЭС являются некоторыми функциями напряжений, температуры и т.д. В этих моделях зависимости нелинейных элементов от напряжений смещения аппроксимируются заранее выбранными аналитическими функциями определенного вида. Следует отметить, что уравнения модели могут быть получены как из физических представлений о работе прибора, так и путем экспертного подбора функциональных зависимостей (например, для наилучшей аппроксимации вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик), в последнем случае модель имеет формальный характер.

Примерами компактных нелинейных моделей являются модели Angelov [11], Curtice-Ettenberg [12], Materka-Kasparzak [13], ЕЕНЕМТ [14] и т.д. Многие из них были либо специально разработаны для НЕМТ (модели Angelov и ЕЕНЕМТ), либо в состоянии описать поведение любой из его нелинейностей. Недосток таких моделей – слишком большое количество параметров для описания нелинейностей, процесс определения которых сложен, занимает много времени и не всегда дает верные результаты. Возможны ситуации, когда стандартные модели в принципе не способны с достаточной точностью одно-

временно воспроизвести ВАХ и малосигнальные параметры рассеяния конкретного транзистора при различных смещениях.

*Компактные физические модели* [2] создаются в результате анализа физических процессов, протекающих в транзисторе с упрощенной геометрией, с упрощенным распределением легирующих примесей, в одномерном, квазидвумерном или квазитрехмерном приближении. При получении таких моделей используется множество других упрощающих предположений: о диапазоне применимости, о погрешности аппроксимации, о постоянстве параметров и др. Детальное исследование физических процессов и строгое обоснование сделанных допущений очень важно для создания простой и одновременно точной компактной модели. Входными параметрами такой модели являются геометрические размеры прибора, толщина активного полупроводникового слоя, длина затвора, легирование активного слоя, подвижность электронов, толщина оксидного слоя затвора и т.д.

Главные недостатки физических моделей – большое количество параметров и недостаточная точность. Однако несмотря на эти проблемы и множество упрощающих предположений, физические модели сохраняют физический смысл своих параметров и часто позволяют установить связь этих параметров с основными параметрами технологического процесса. Примерами физических моделей, которые присутствуют во многих современных САПР, являются BSIM4 [15], EKV [16], HSPICE Level 28 [17].

В связи с вышеперечисленными недостатками рассмотренных компактных моделей сравнительно недавно были предложены *универсальные (табличные) нелинейные модели* СВЧ-транзисторов в виде ЭС (рис. 3), которые строятся на основе непосредственно измеренных параметров прибора на постоянном токе и на высоких частотах (малосигнальные параметры рассеяния). В этих моделях используется аппроксимация нелинейных зависимостей элементов ЭС (источников тока и заряда) с помощью полиномов или сплайнов. Нелинейные параметры модели определяются интегрированием зависящих от смещения элементов малосигнальной ЭС, полученных путем экстракции в различных рабочих точках.

Достоинствами таких моделей являются высокая точность в широком диапазоне изменения частоты, уровня сигнала и режимов работы транзистора, простота экстракции, малое число параметров. Кроме того, процедура построения универсальной модели в принципе может быть формализована и автоматизирована. К недостаткам относятся: невозможность экстраполяции характеристик транзистора за пределами диапазона изменения параметров, для которого строилась модель; сложность обеспечения связи результатов моделирования с параметрами технологического процесса и геометрией прибора; необходимость уделять специальное внимание вопросам сходимости нелинейного анализа при использовании метода гармонического баланса. Теоретические основы построения табличных нелинейных моделей СВЧ-транзисторов изложены в [18].

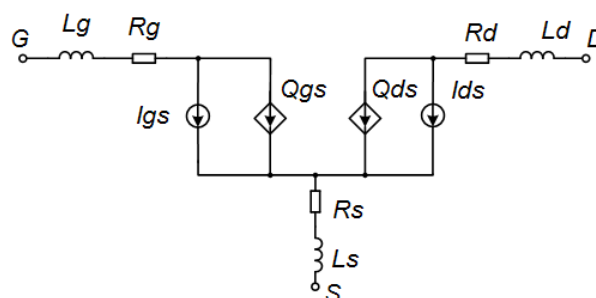


Рис. 3. Универсальная нелинейная модель СВЧ полевого транзистора

Также существуют более простые табличные модели, состоящие из таблицы, в которой хранятся экспериментально полученные данные, и алгоритма их извлечения и обработки. Применительно к проектированию СВЧ-устройств такие модели имеют ограниченные возможности – они позволяют описать лишь режимные зависимости малосигнальных параметров рассеяния, а также статические вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики транзистора. Их недостатки такие же, как и у табличных универсальных моделей.

**Поведенческая модель объекта (behavioral model)** – это модель в виде «черного ящика», в которой используются некоторые математические функции или преобразования для описания связи входных и выходных данных, последние обычно получают экспериментально либо при использовании более детальных (физико-технологических или компактных) моделей. Поведенческие модели являются формальными, т.е. строятся на основе формального сходства между поведением модели и объекта относительно внешних выводов. При этом вид описывающих функций выбирается не на основе анализа физических процессов, происходящих в полупроводниковом приборе, а из условий быстродей-

ствия и требуемой точности воспроизведения взаимосвязи входных и выходных переменных. Таким образом, поведенческие модели никак не отражают внутреннюю структуру и процессы в приборе, в связи с этим в отечественной литературе используется также термин «бесструктурные модели» [5].

Данный тип моделей в основном используется на более высоких уровнях абстракции – при моделировании сложного СВЧ-устройства целиком или при системном проектировании [1]. Однако поведенческий подход можно применить и к СВЧ-транзисторам.

Наиболее простой поведенческой моделью, используемой при моделировании активных СВЧ-устройств, являются малосигнальные параметры транзистора как четырехполюсника – чаще всего  $S$ -параметры. При таком подходе транзистор (нелинейный прибор) фактически заменяется на заданной частоте в некоторой окрестности установившегося режима линейным эквивалентным четырехполюсником. Для проектирования устройств, работающих в нелинейном режиме, используют большесигнальные  $S$ -параметры, а также нагрузочные характеристики транзисторов, измеряемые на специализированных установках с автоматическими тюнерами (source- и load-pull-измерения) [19]. Дальнейшим развитием идеи «черного ящика» являются  $X$ -параметры, разработанные компанией Agilent [20].  $X$ -параметры – это математическое расширение  $S$ -параметров; они описывают нелинейную цепь в режиме малого и большого сигнала, интермодуляционные искажения, коэффициент передачи по мощности и т.п.  $X$ -параметры позволяют характеризовать нелинейное устройство при любом количестве портов и возбуждающих сигналов.

Главным достоинством описания СВЧ-приборов с помощью большесигнальных  $S$ - или  $X$ -параметров является высокая скорость вычисления характеристик нелинейных устройств – практически, как для линейных цепей, и гораздо выше, чем при использовании нелинейных эквивалентных схем активного элемента на основе метода гармонического баланса. Однако большесигнальные  $S$ -параметры адекватно описывают нелинейный прибор только в определенной окрестности установившегося режима для первой гармоники сигнала. Определение  $X$ -параметров требует проведения большого объема измерений при изменении в заданных диапазонах уровней и частот возбуждающих сигналов, постоянных напряжений на электродах транзистора и т.д. Сказанное определяет недостатки большесигнальных  $S$ - и  $X$ -параметров по сравнению с нелинейными эквивалентными схемами.

Еще одним перспективным подходом в создании поведенческих нелинейных моделей СВЧ полупроводниковых приборов являются модели в виде нейронных сетей. К их достоинствам относятся универсальность, независимость методики получения модели от типа транзистора, высокие точность и быстродействие. Теория искусственных нейронных сетей применительно к транзисторам и усилителям мощности описана в [21].

**Заключение.** В работе выполнен обзор используемых в настоящее время типов моделей НЕМТ транзисторов, основанный на общей классификации моделей полупроводниковых приборов. Обзор может быть полезен для специалистов по проектированию СВЧ-устройств при выборе моделей СВЧ-транзисторов.

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. Aaen P. Modeling and Characterization of RF and Microwave power FETs / P. Aaen, J. Pla, J. Wood. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 362 p.
2. Денисенко В. Моделирование МОП транзисторов. Методологический аспект // Компоненты и технологии. – 2004. – № 7. – С. 26–29; № 8. – С. 56–61; № 9. – С. 32–39.
3. Сайт фирмы Synopsys [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.synopsys.com/products/tcad/tcad.html>, свободный (дата обращения: 05.10.2010).
4. Сайт фирмы Silvaco [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.silvaco.com/>, свободный (дата обращения: 05.10.2010).
5. Шварц Н.З. Линейные транзисторные усилители СВЧ. – М.: Сов. радио, 1980. – 368 с.
6. An Approach to Determining an Equivalent Circuit for HEMT's / K. Shirakawa, H. Oikawa, T. Shimura et al. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 1995. – Vol. 43, № 3. – P. 499–503.

7. A Technique for Extracting Small-Signal Equivalent-Circuit Elements of HEMTs / M.Y. Jeon, B.J. Kim, Y.J. Jeon, Y.H. Jeong // IEICE Trans. Electron. – 1999. – Vol. E82-C, №11. – P. 1968–1976.
8. A New Method for Determining the FET Small-Signal Equivalent Circuit / G. Dambriane, A. Cappy, F. Heliodore, E. Playez // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 1988. – Vol. 36, № 7. – P. 1151–1159.
9. 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.
10. Ooi B.L. Analytical Extraction of Extrinsic and Intrinsic FET parameters / B.L. Ooi, Z. Zhong, M.S. Leong // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 2009. – Vol. 57, № 57. – P. 254–261.
11. An Empirical Table-Based FET Model / I. Angelov, N. Rorsman, J. Stenarson, M. Garcia, H. Zirath // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2002. – Vol. 37, № 5. – P. 605–616.
12. Curtice W.R. A Nonlinear GaAs FET Model for Use in the Design of Output Circuits for Power Amplifier / W.R. Curtice, M. Ettenberg // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1985. – Vol. 33, № 12. – P. 1383–1394.
13. Materka A. Computer calculations of large-signal GaAs FET amplifier characteristic / A. Materka, T. Kacprzak // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1985. – Vol. 33. – P. 129–135.
14. Agilent ADS 2008 Update 2 Help. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.home.agilent.com/agilent/editorial.jsp?cc=US&lc=eng&ckey=1528450&nid=11143.0.00&id=1528450&pselect=SR.General>, свободный (дата обращения: 05.10.2010).
15. Cheng Y. MOSFET modeling & BSIM3 user's guide / Y. Cheng, C. Hu. – New York: Kluwer Academic Publishers, 1999. – 461 p.
16. Enz C.C. An analytical MOS transistor model valid in all regions of operation and dedicated to low voltage and low-current applications / C.C. Enz, F. Krummenacher, E.A. Vittoz // J. Analog Integrated Circuit and Signal Processing. – 1995. – Vol. 8. – P. 81–114.
17. Foty D.P. MOSFET Modeling with Spice. Principle and Practice. – N.J.: Prentice Hall PTR, 1997. – 653 p.
18. A simplified broad-band large-signal nonquasi-static table-based FET model / M. Fernandez-Barciela, P.J. Tasker, Y. Campos-Roca et al. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 2000. – Vol. 48, № 3. – P. 395–405.
19. Cusack J.M. Automatic load contour mapping for microwave power amplifiers / J.M. Cusack, S.M. Perlow, B.S. Perlman // IEEE Trans. MTT. – 1974. – Vol. 22. – P. 1146–1152.
20. Сайт фирмы Agilent Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.home.agilent.com/>, свободный (дата обращения: 05.10.2010).
21. Golio M. RF and microwave circuits, measurements and modeling. – Second edition. – CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2008. – 1954 p.

---

**Коколов Андрей Александрович**

Мл. научн. сотрудник ЛИКС, аспирант каф. КСУП ТУСУРа  
Тел.: +7-923-405-93-59  
Эл. почта: kokolovaa@gmail.com

**Шеерман Федор Иванович**

Канд. техн. наук, доцент каф. КСУП ТУСУРа  
Тел.: +7-913-805-94-54  
Эл. почта: sfi1493@ms.tusur.ru

**Бабак Леонид Иванович**

Канд. техн. наук, зам. директора НОЦ «Нанотехнологии»,  
доцент каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа  
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17  
Эл. почта: leonid.babak@rambler.ru

Kokolov A.A., Sheyerman F.I., Babak L.I.

**Review of mathematical models of microwave high electron mobility transistors**

The classification and review of mathematical models of microwave high electron mobility transistors (HEMTs) are presented. The description of HEMT models is based on the modern general model classification of semiconductor devices. The review is intended for microwave designing engineers.

**Keywords:** classification, nonlinear model, microwave transistor, HEMT.