

П. А. ЕМЦЕВ

Украина, НТУУ "Киевский политехнический институт"
E-mail: yemtsev@gmx.netДата поступления в редакцию
15.09 2004 г.Оппонент к. т. н. В. И. ТИМОФЕЕВ
(НТУУ "КПИ", г. Киев)

МАЛОСИГНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ТРАНЗИСТОРА В РАЗРАБОТКЕ СВЧ МАЛОШУМЯЩИХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Методика определения параметров малосигнальной модели транзистора позволяет при минимальном количестве исходных данных получить модель, пригодную для практического применения.

Процесс разработки любого устройства СВЧ начинается с моделирования его работы. В то же время ни одна из систем автоматизированного проектирования устройств СВЧ не обладает исчерпывающей библиотекой активных компонентов. Основной причиной этой ситуации является то обстоятельство, что процесс моделирования активных компонентов является трудоемким, требует наличия дорогостоящего оборудования (обычно — векторного анализатора цепей и измерителя характеристик по постоянному току). Поэтому стоимость создания библиотек компонентов может быть соизмерима со стоимостью создания самого программного обеспечения или даже превышать ее.

В сложившейся ситуации процесс проектирования часто начинается с моделирования активных компонентов, которые предполагается использовать в устройстве. Если имеется в наличии упомянутое выше измерительное оборудование, то появляется возможность самостоятельного построения необходимой модели.

Транзистор ATF-36077 с высокой подвижностью электронов (производитель — Hewlett Packard) является малошумящим прибором с высоким коэффициентом усиления, предназначенным, по сведениям производителя, для построения малошумящих усилителей (МШУ) в диапазоне 2—18 ГГц. В документации приводятся следующие данные: параметры рассеяния и шумовые параметры в диапазоне 1—18 ГГц в рабочем режиме при одном значении смещения и параметры рассеяния в диапазоне 11—13 ГГц для случая напряжения на затворе ниже напряжения отсечки. Эти данные можно использовать в процессе проектирования, однако, как будет показано ниже, приме-

Автор выражает благодарность И. К. Сундучкову за помощь в получении экспериментальных результатов.

нение малосигнальной модели позволяет исследовать поведение транзистора в более широком диапазоне частот.

Так как S -параметры приведены для одного значения смещения, рекомендуемого производителем, то возможно построение лишь малосигнальной модели. Такая модель окажется полезной для разработки МШУ и усилителей малых сигналов, где вероятность попадания на вход большого сигнала (и, как следствие, проявление нелинейных эффектов в усилителе) достаточно низка.

В данной публикации приводится методика определения параметров малосигнальной модели транзистора, позволяющая при минимальном количестве исходных данных получить модель, пригодную для практического применения при разработке малошумящих усилителей диапазона СВЧ.

Модель и методика определения параметров

Эквивалентная схема модели (рис. 1) представляет собой несколько модифицированную эквивалентную схему классической малосигнальной модели. (Информацию о малосигнальных моделях можно найти в [1, 2].) Методика определения параметров в целом похожа на описанную в [1].

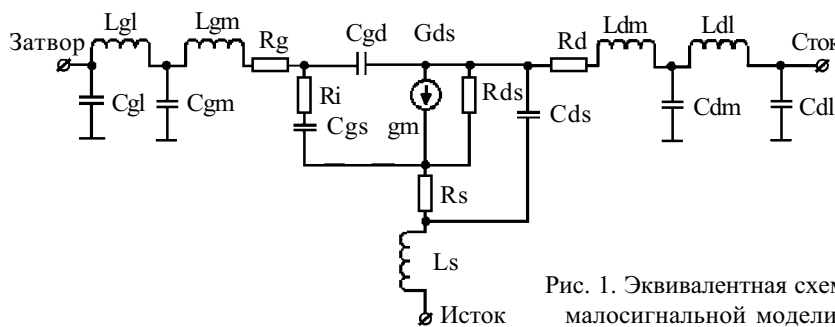


Рис. 1. Эквивалентная схема малосигнальной модели

C_{gl} — емкость вывода затвора; L_{gl} — индуктивность вывода затвора; C_{gm} — емкость металлизации области затвора; L_{gm} — индуктивность металлизации области затвора; R_g — сопротивление затвора; R_i — сопротивление затвор-исток; C_{gs} — емкость затвор-исток; R_s — сопротивление истока; L_s — индуктивность вывода истока; C_{gd} — емкость затвор-сток; G_{ds} — выходная проводимость; g_m — крутизна проходной характеристики; R_{ds} — сопротивление канала сток-исток; C_{ds} — емкость сток-исток; R_d — сопротивление стока; L_{dm} — индуктивность металлизации области стока; C_{dm} — емкость металлизации области стока; L_{dl} — индуктивность вывода стока; C_{dl} — емкость вывода стока

Данные производителя ATF-36077 содержат результаты измерений в «выключенном» состоянии и в рабочем режиме. Измерения «выключенного» транзистора (т. е. находящегося при нулевом напряжении "сток-исток" и отрицательном ниже напряжения отсечки напряжении "затвор-исток") в спецификации производителя приводятся для узкого диапазона частот — 11—12 ГГц, поэтому использовались лишь результаты измерения транзистора в рабочем режиме.

В этом случае сначала определяются емкости входная (состоящая из C_{gs} , C_{gl} и C_{gm}), выходная (состоящая из C_{ds} , C_{dl} и C_{dm}) и проходная (C_{gd}). Результаты машинного расчета этих емкостей в диапазоне 5—12 ГГц сведены в табл. 1.

Таблица 1
Результаты расчета емкостей

$C_{вх}$, пФ	0,07—0,47
$C_{вых}$, пФ	0,05—0,21
$C_{пр}=C_{gd}$, пФ	0,007—0,060

Расчетные значения емкостей имеют значительный разброс. Это не является критичным, т. к. цель на данном этапе — найти начальные значения для последующей оптимизации.

Затем можно определить значения индуктивностей металлизации и емкостей между металлизацией контактных площадок затвора и стока и подложкой путем электромагнитного моделирования в пакете Sonnet. Это наиболее простой способ определения параметров реактивностей, вносимых металлизацией.

Начальные значения элементов g_m и R_{ds} с успехом определяются из результатов измерений по постоянному току.

Начальные значения индуктивностей выводов L_{gl} и L_{dl} можно найти из рассмотрения конструкции корпуса, полагая, что на 1 мм длины приходится 1 нГн индуктивности [3, с. 192]. Конечно же, необходимо учитывать, что пайка выполняется на некотором расстоянии от корпуса, впрочем, часто весьма близком

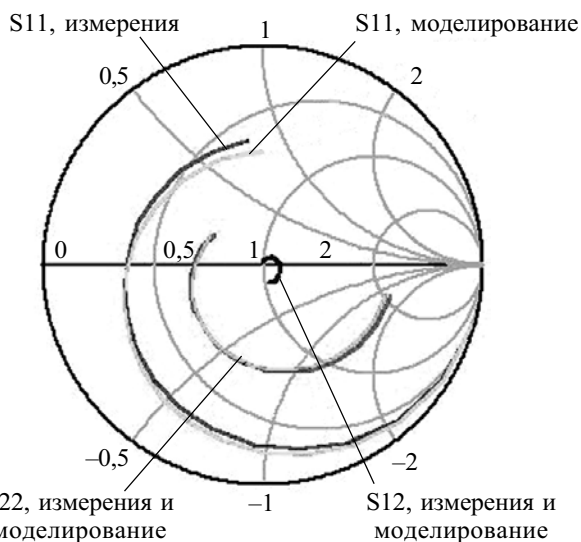


Рис. 2. Результаты измерений и моделирования параметров S11, S12, S22 корпусированного транзистора ATF-36077 в диапазоне частот 1...18 ГГц

— около 0,5—1 мм. Индуктивность выводов истока L_s можно принять равной десятой части от индуктивностей выводов затвора или стока, т. к. выводов истока два и они гораздо шире.

Определение значений сопротивлений R_g , R_i , R_s , R_d — задача, не всегда имеющая однозначное решение. Можно порекомендовать “flyback-метод”, описанный в [4, с. 355]. В данном случае использовались значения сопротивлений, типичные для маломощных транзисторов с высокой подвижностью электронов [5].

После нахождения всех начальных значений осуществлялась оптимизация с целью получения минимального отклонения между данными измерений и моделирования. Результирующие кривые представлены на рис. 2 и 3. Об отклонении результатов моделирования от результатов измерений можно судить по рис. 4.

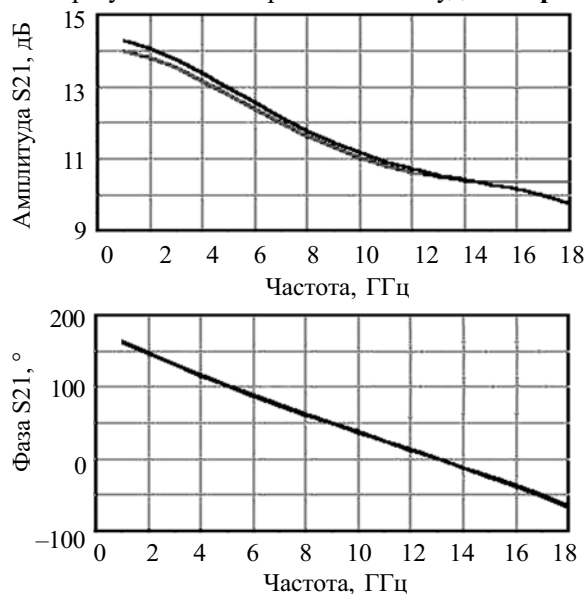


Рис. 3. Результаты измерений и моделирования параметра S21 корпусированного транзистора ATF-36077

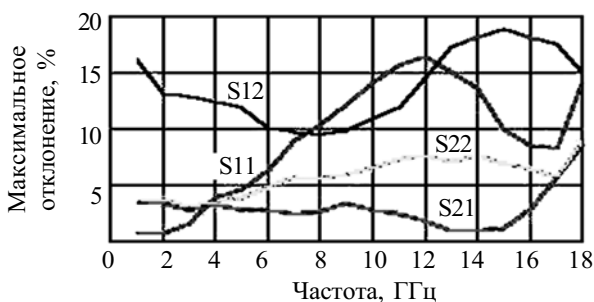


Рис. 4. Максимальное относительное отклонение результатов моделирования от результатов измерений

Результаты измерений и моделирования соответствуют друг другу точно, поэтому можно предположить, что параметры элементов определены корректно. Их значения сведены в табл. 2, где τ — время задержки.

Транзистор ATF-36077 может быть использован и на более высоких частотах, чем рекомендовано изготовителем. Быстродействие прибора в значительной степени ограничено паразитными элементами корпуса. Повысить быстродействие представляется воз-

Таблица 2

Значения параметров элементов эквивалентной схемы после оптимизации

Cgl, пФ	Lgl, пГ	Cgm, пФ	Lgm, пГ	Rg, Ом	Ri, Ом	Cgs, пФ	Rs, Ом	Ls, пГ	Cgd, пФ
0,144	464	0,05	100	1	3	0,21	3	44,4	0,0243
gm, А/В	τ , пс	Rds, Ом	Cds, пФ	Rd, Ом	Ldm, пГ	Cdm, пФ	Ldl, пГ	Cdl, пФ	
0,0857	6,1	146	0,168	3	100	50	312	0,1	

можным путем удаления корпуса, т. е. в бескорпусном варианте. В этом случае чтобы модель сохранила адекватность, необходимо исключить элементы, описывающие корпус и выводы. Это — Cgl, Lgl, Ls, Ldl, Cdl. Таким образом, модель позволяет предсказать параметры транзистора без корпуса, т. е. получить информацию, не приведенную в спецификации производителя. В этом проявляется одно из главных преимуществ использования модели перед использованием непосредственно матриц рассеяния.

Результаты моделирования S-параметров транзистора без корпуса показаны на рис. 5.

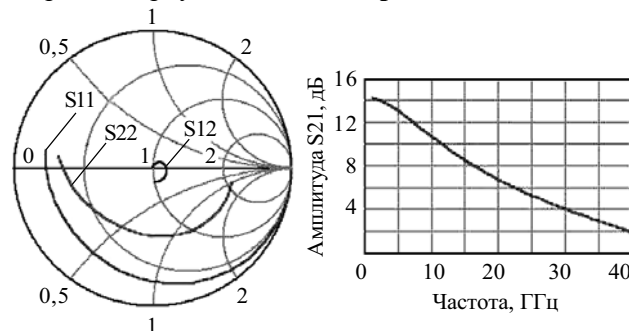


Рис. 5. Результаты моделирования транзистора ATF-36077 в бескорпусном варианте в диапазоне частот 1...40 ГГц

Очевидно, что усиление остается достаточно высоким вплоть до частоты 40 ГГц, т. е. транзистор можно использовать на значительно более высоких частотах, чем рекомендовано изготовителем.

Для проверки правильности приведенных положений было проведено сопоставление данных измерений и моделирования однокаскадного усилителя для диапазона 26...37 ГГц с использованием транзистора ATF-36077 без корпуса. Материал, использованный для подложки, — кварц с диэлектрической проницаемостью 3,78. Усилитель был настроен для получения усиления в максимально широком диапазоне частот. Топология усилителя приведена на рис. 6.

Моделирование работы усилителя проводилось в системах ADS 1.1 и Sonnet 6.0. Сначала было проведено моделирование волновых характеристик металлизации как схемы с четырьмя портами (вход, вы-

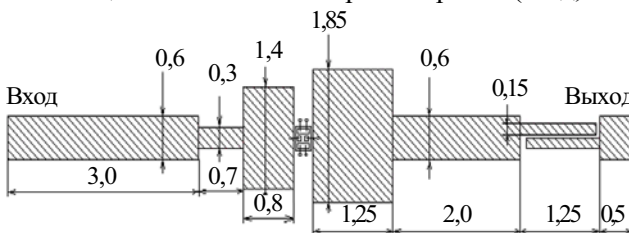


Рис. 6. Топология усилителя на ATF-36077

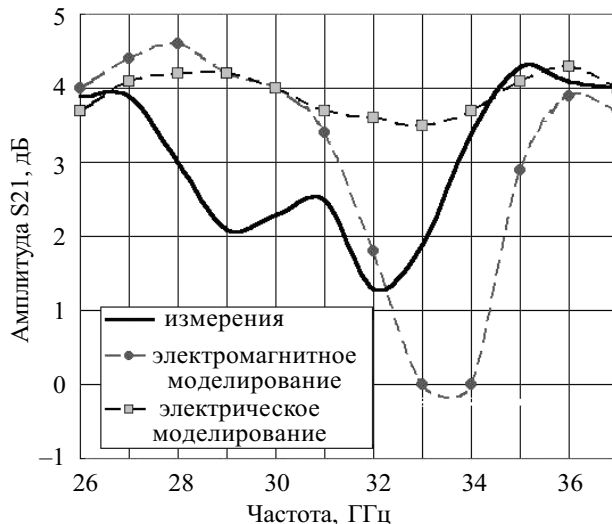


Рис. 7. Параметр S21 усилителя на ATF-36077

ход и контакты затвора и стока транзистора). Затем файл в формате S4P переносился в ADS, где и осуществлялось моделирование электрических характеристик. Также было опробовано моделирование только электрических характеристик, для чего были использованы элементы библиотеки микрополосковых элементов ADS. Результаты измерения и моделирования параметра S21 этого усилителя приведены на рис. 7.

Заключение

Представленная методика определения параметров обладает следующими положительными особенностями:

- минимальным количеством данных, необходимых для ее построения.
- достаточной адекватностью полученной модели;
- сравнительной простотой.

Методика включает следующие стадии:

1. Определение начальных значений входной, выходной и проходной (Cgd) емкостей.
2. Определение начальных значений емкостей Cgm, Cdlm и индуктивностей Lgm, Ldm путем электромагнитного моделирования (рекомендуется программа Sonnet).
3. Определение начальных значений индуктивностей Lgl, Ldl и Ls.
4. Определение начальных значений емкостей Cgs, Cds, Cgl и Cdl.
5. Определение начальных значений gm и Gds из результатов измерений по постоянному току.
6. Определение начальных значений сопротивлений Rg, Rd, Ri и Rs.
7. Финальная оптимизация параметров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Емцев П. А. Моделирование транзисторов с высокой подвижностью электронов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2003.— № 6.— С. 20—26.
2. Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ устройств.— М.: Радио и связь, 1987.
3. Ред Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике.— М.: Мир, 1990.
4. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия.— М.: Мир, 1991.
5. EC2612. 40 GHz Super Low Noise HEMT. Transistor specification.