

УДК 681.5.08

И.М. Добуш, А.В. Степачева, А.А. Коколов, А.С. Сальников, Л.И. Бабак

Программное обеспечение для автоматизации измерений, деэмбеддинга и построения линейных моделей СВЧ полевых транзисторов

Разработаны программные модули для автоматизации зондовых измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ), параметров рассеяния, исключения паразитных влияний контактных площадок (деэмбеддинга) и построения малосигнальных моделей MESFET- и HEMT-транзисторов. Программы включены в состав системы INDESYS-MS, интегрированной с зондовой измерительной установкой.

Ключевые слова: автоматизация, зондовые СВЧ-измерения, деэмбеддинг, построение моделей, HEMT-транзистор, монолитная интегральная схема.

Ключевым этапом создания СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) являются зондовые измерения параметров активных и пассивных элементов на полупроводниковой пластине. При этом измерения позволяют не только проверить, удовлетворяют ли изготовленные компоненты и устройства поставленным требованиям, но также построить и верифицировать математические модели элементов МИС.

В частности, для построения нелинейных моделей СВЧ-транзисторов [1, 2] требуется выполнить измерения параметров рассеяния и произвести экстракцию малосигнальной эквивалентной схемы (ЭС) в различных рабочих точках. Проведение подобных измерений на зондовых станциях, оснащенных типовым программным обеспечением (ПО), является трудоемким и требует больших временных затрат.

При измерениях на подложке тестовая структура, помимо измеряемого компонента (например, транзистора), содержит такие элементы, как контактные площадки и подводящие линии, которые оказывают паразитное влияние на характеристики измеряемого устройства в СВЧ-диапазоне. Для исключения (деэмбеддинга) указанного влияния применяются специальные алгоритмы и программы.

В настоящей работе представлены программные модули, выполняющие все перечисленные операции, связанные с автоматизацией измерений, обработкой полученных данных и построением малосигнальных моделей СВЧ полевых транзисторов.

Программы входят в состав системы INDESYS-MS (Intelligent Design System – Measurement Suite) [3] и используются совместно со стендом на базе зондовой станции, обеспечивающим измерения параметров рассеяния СВЧ МИС в частотном диапазоне до 40 ГГц, а также вольт-амперных характеристик транзисторов. Стенд включает зондовую станцию Cascade Microtech серии Summit 11K, векторный анализатор цепей (ВАЦ) Rohde & Shwartz ZVA 40, двухканальный источник питания (ИП) Agilent E3646A и персональный компьютер (ПК).

Расширяемая программная система INDESYS-MS, реализованная на базе среды INDESYS [4], предназначена для автоматизации измерений (в том числе зондовых) СВЧ-устройств и приборов. В частности, она осуществляет автоматический поиск и идентификацию измерительных приборов, управление процессом измерений, обработку, отображение, хранение и статистический анализ результатов измерений, поддержку скриптов для реализации алгоритмов различной степени сложности по управлению приборами и обработке данных непосредственно на участке измерений.

Программный модуль для автоматизации измерений. Упрощенная структурная схема установки для зондовых измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ) и параметров рассеяния СВЧ-транзисторов на базе стенда приведена на рис. 1.

После установки режима (диапазон частот, количество точек, полоса измерительного фильтра, мощность сигнала), калибровки ВАЦ и установки СВЧ-зондов на исследуемый транзистор на персональном компьютере запускается программная среда INDESYS-MS для подключения измерительных приборов (ВАЦ и ИП) и диалог модуля автоматизации измерений Measurement. Процесс измерений включает два основных режима: «предустановка» и «измерение».

1. Режим «предустановка», когда оператор задает настройки измерений – наименование производителя и тип исследуемого транзистора, диапазон и шаг изменения значений напряжений (затвор-исток и сток-исток), ограничение по току для каждого канала ИП и тип характеристики в соответствующем диалоге программы (рис. 2).

2. Режим «измерение», который проходит в автоматическом режиме и завершается сохранением результатов в стандартные файлы (*.ivd, *.s2p, *.mdf) или в базу данных [5].

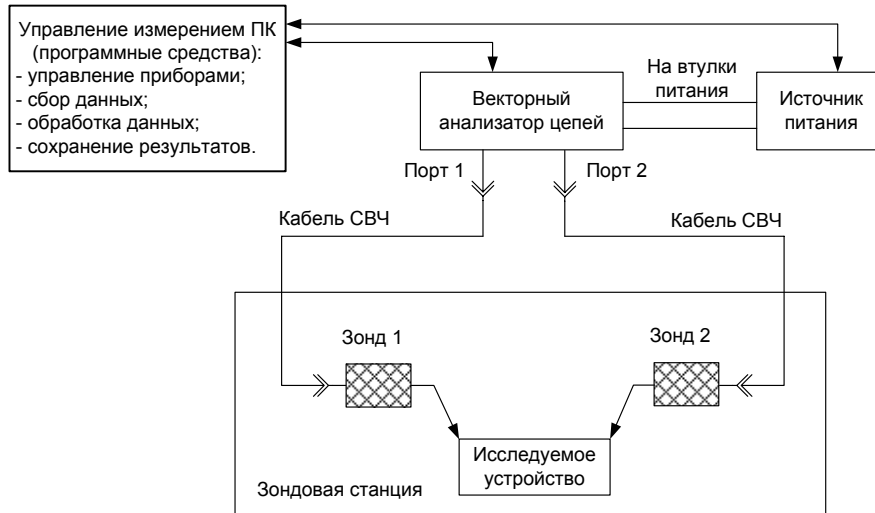


Рис. 1. Структурная схема установки для измерения ВАХ и параметров рассеяния СВЧ-транзисторов

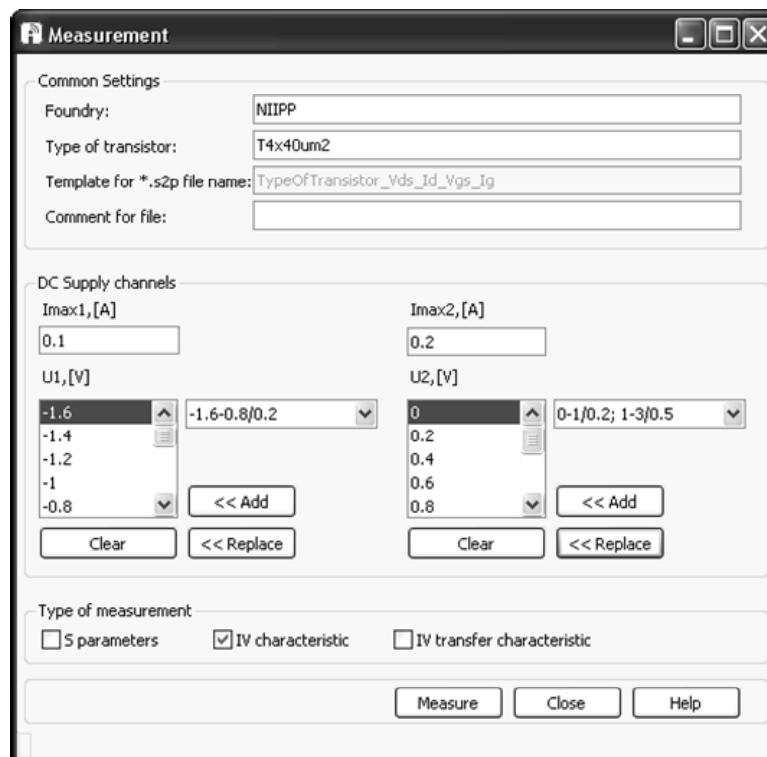


Рис. 2. Диалоговое окно программного модуля Measurement

Программный модуль деэMBEDдинга. Произвести исключение паразитных влияний контактных площадок позволяет дальнейшая обработка измеренных параметров рассеяния с использованием программы Deembedding. В ней реализовано четыре метода деэMBEDдинга, которые охватывают частотный диапазон до 50 ГГц: «Open», «Open-Short», «Pad-Open-Short» и «L-2L». В диалоговом режиме (рис. 3) оператор выбирает метод деэMBEDдинга и загружает измеренные параметры рассеяния транзистора в различных рабочих точках.

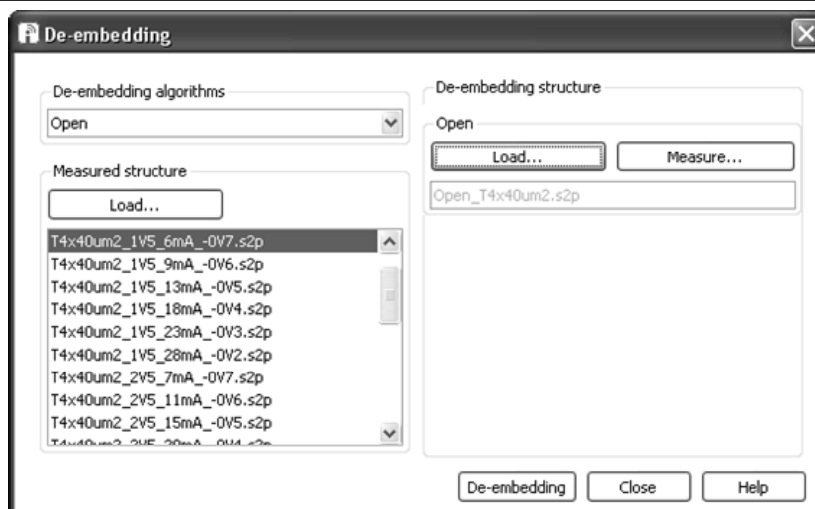


Рис. 3. Диалоговое окно программного модуля Deembedding

Далее необходимо измерить или загрузить параметры рассеяния тестовых структур (стандартов), количество и тип которых зависят от выбранного метода деэмбеддинга. Полученные результаты сохраняются в формате *.s2p.

Программный модуль для построения линейных моделей СВЧ полевых транзисторов. Программа Extraction (рис. 4) позволяет построить малосигнальную модель MESFET- или HEMT-транзистора по измеренным параметрам рассеяния в различных рабочих точках. В ней используются три метода экстракции параметров ЭС транзистора, применяемых в диапазоне частот до 60 ГГц: Jeon, Dambrine и оригинальный метод «LICS» [2].

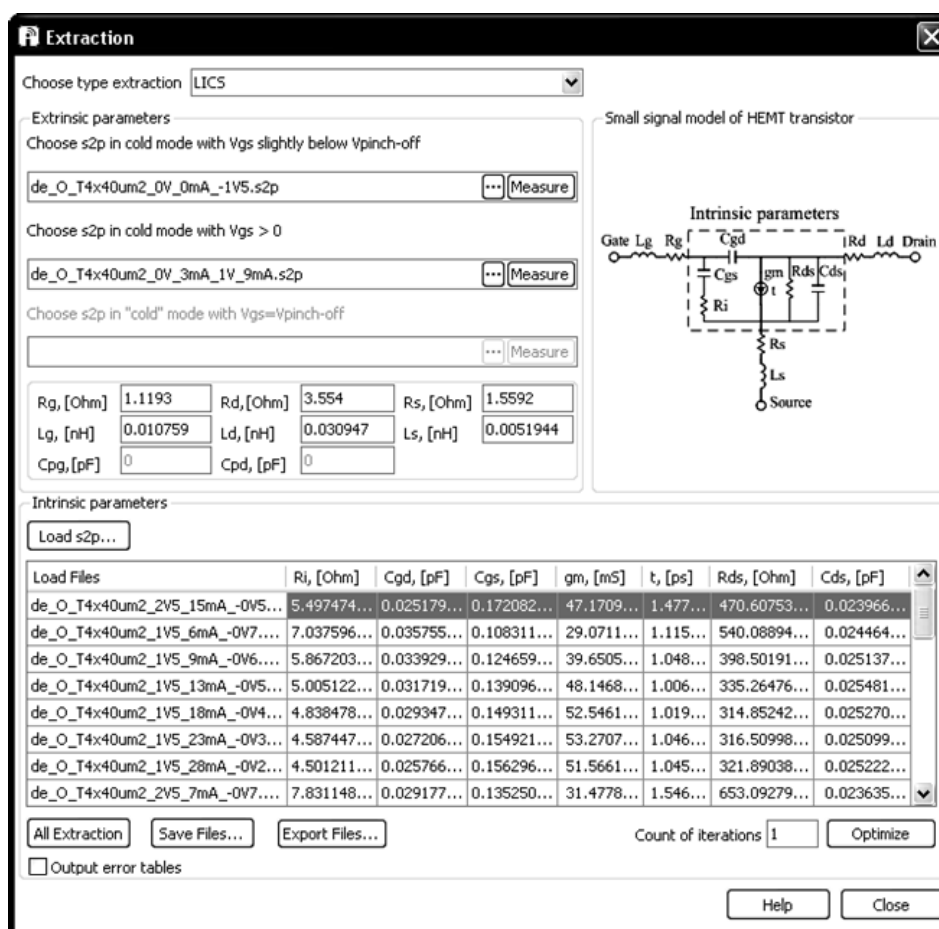


Рис. 4. Диалоговое окно программного модуля Extraction

Входными данными являются параметры рассеяния транзистора, измеренные в холодных режимах (их количество зависит от выбранного алгоритма экстракции), и в нескольких рабочих точках. В результате работы программы определяется малосигнальная модель транзистора в виде ЭС с рассчитанными внешними и внутренними параметрами, при этом последние могут дополнительно оптимизироваться.

Оператор может сохранить полученные параметры моделей транзистора в текстовый файл либо экспортировать ЭС в пакет Microwave Office. Кроме того, пользователь имеет возможность сравнить параметры рассеяния транзистора и полученной модели по значениям абсолютной и относительной ошибок.

Применение программных модулей в задачах измерения и моделирования СВЧ-транзистора. Опишем процесс автоматизированного измерения, деэMBEDдинга и экстракции параметров ЭС гетероструктурного СВЧ полевого транзистора в различных рабочих точках с использованием разработанных программных модулей.

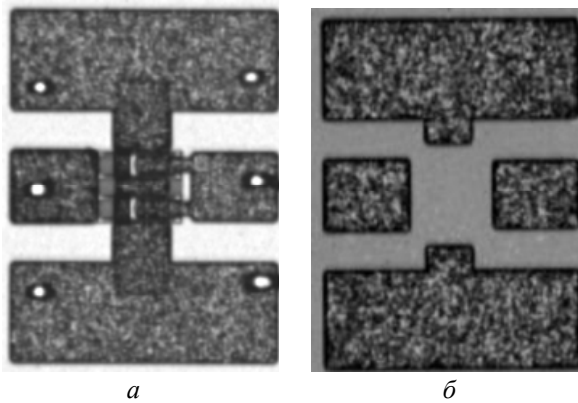


Рис. 5. Измеряемый GaAs-pHEMT-транзистор (а) и тестовая структура OPEN (б)

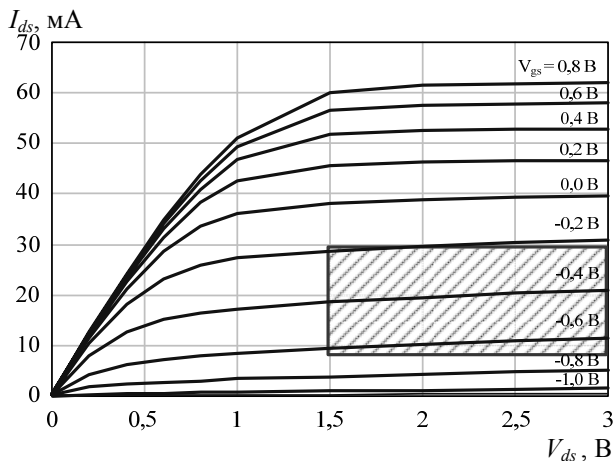


Рис. 6. Выходная ВАХ GaAs pHEMT с шириной затвора 4×40 мкм

На рис. 5, а представлена фотография исследуемого транзистора изготовленного по 0,3 мкм GaAs-pHEMT-технологии ОАО «НИИП» (г. Томск) с шириной затвора 4×40 мкм.

Как правило, анализ работы активного элемента начинается с измерения его ВАХ. На рис. 2 настройки диалога программы Measurement соответствуют режиму измерения выходных ВАХ транзистора: диапазоны напряжений сток-исток $V_{ds} = 0 \dots 1$ В (шаг $\Delta V_{ds} = 0,2$ В), $V_{ds} = 1 \dots 3$ В (шаг $\Delta V_{ds} = 0,5$ В) и напряжений затвор-исток $V_{gs} = -1,6 \dots 0,8$ В (шаг $\Delta V_{gs} = 0,2$ В). Полученная ВАХ исследуемого транзистора приведена на рис. 6. После этого выбираем интересные рабочие точки транзистора для измерения его малосигнальных параметров.

Необходимо отметить, что для построения табличных нелинейных моделей СВЧ-транзисторов может использоваться полная ВАХ и количество рабочих точек может превышать более 200, измерение которых типовым ПО может потребовать несколько часов.

В качестве примера выберем участок ВАХ транзистора характерный для маломощных усилителей (ток стока (I_{ds}) 10–30 мА) в диапазоне напряжений: $V_{ds} = 1,5 \dots 3$ В (шаг $\Delta V_{ds} = 0,5$ В), $V_{gs} = -0,7 \dots -0,2$ В (шаг $\Delta V_{gs} = 0,1$ В), на рис. 6 указанный участок отмечен штриховкой. Используя диалог Measurement (см. рис. 2) и применяя соответствующие настройки, проводим измерения S-параметров транзистора в 24 рабочих точках в частотном диапазоне 0,1–40 ГГц.

Далее производим исключение паразитных влияний контактных площадок программой Deembedding, в диалоговом режиме (см. рис. 3) выбираем метод «Open» и загружаем измеренные параметры рассеяния транзистора в различных рабочих точках, после чего необходимо измерить или загрузить параметры рассеяния тестовой структуры «OPEN» (см. рис. 5, б). Таким образом, получаем обработанные результаты измерений S-параметров для 24 режимов работы транзистора. Для демонстрации полученных результатов в табл. 1 приведены значения модуля коэффициента усиления ($|S_{21}|$), максимального коэффициента усиления по мощности (G_{max}) и коэффициента передачи по току ($|H_{21}|$) GaAs-pHEMT-транзистора ($V_{ds} = 2,5$ В; $I_{ds} = 15$ мА; $V_{gs} = -0,5$ В) на нескольких частотах до и после устранения влияния контактных площадок.

Таблица 1

**Значения параметров $|S_{21}|$, G_{\max} и $|H_{21}|$
GaAs-pHEMT-транзистора ($V_{ds} = 2,5$ В; $V_{gs} = -0,5$ В) до и после деэбеддинга**

Частоты, ГГц	$ S_{21} $, дБ		G_{\max} , дБ		$ H_{21} $, дБ	
	до	после	до	после	до	после
1	11,92	11,93	23,62	23,79	29,64	30,47
10	9,29	9,66	14,05	14,38	10,61	11,37
20	5,55	6,24	11,17	11,52	4,89	5,59
30	2,70	3,53	9,46	9,76	2,14	2,71
40	0,79	1,62	8,84	9,09	0,37	0,90

Поиск значений элементов ЭС для вышеуказанных режимов работы GaAs-pHEMT-транзистора осуществим при помощи модуля Extraction. Для этого в диалоговом режиме (см. рис. 4) выбираем метод «LICS» и на первом этапе проводим измерения (или загружаем файлы) транзистора в «холодных» режимах для расчета внешних (паразитных) элементов ЭС транзистора 4×40 мкм параметров ЭС R_g , R_d , R_s , L_g , L_d , L_s (рис. 7), которые являются общими для всех режимов работы транзистора.

Согласно методике, описанной в [2], для расчета паразитных элементов (табл. 2) использовались S -параметры транзистора при нулевом напряжении сток-исток ($V_{ds} = 0$ В) и напряжениях затвор-исток ниже напряжения отсечки ($V_{gs} = -1,5$ В), а также при положительном напряжении смещения ($V_{gs} = 1$ В).

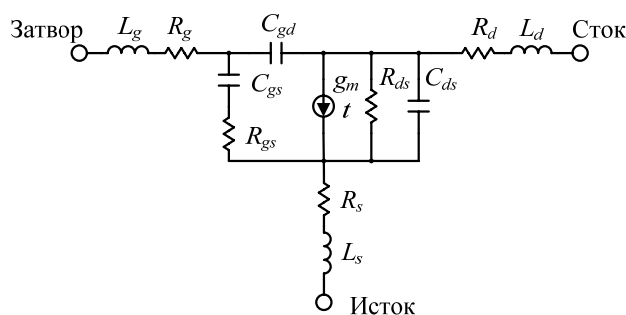


Рис. 7. Малосигнальная модель полевого транзистора

Таблица 2

Внешние элементы ЭС GaAs-pHEMT-транзистора 4×40 мкм

R_{g2} , Ом	R_d , Ом	R_s , Ом	L_{g2} , нГн	L_d , нГн	L_s , нГн
1,12	3,55	1,56	0,0107	0,0309	0,0052

На втором этапе, загружая S -параметры для 24 режимов работы транзистора, произведем экстракцию внутренних элементов ЭС для каждой рабочей точки, результаты расчета заносятся в таблицу (см. рис. 4).

В качестве примера, для анализа полученных результатов, произведем экспорт параметров ЭС (табл. 3) GaAs-pHEMT-транзистора с шириной затвора 4×40 мкм для режима $V_{ds} = 2,5$ В; $I_{ds} = 15$ мА; $V_{gs} = -0,5$ В в САПР AWR Microwave Office.

Таблица 3

Внутренние элементы ЭС GaAs-pHEMT-транзистора 4×40 мкм ($V_{ds} = 2,5$ В; $V_{gs} = -0,5$ В)

R_{gs} , Ом	C_{gd} , пФ	C_{gs} , пФ	g_m , мСм	t , пс	R_{ds} , Ом	C_{ds} , пФ
5,5	0,025	0,172	47,14	1,47	470	0,024

На рис. 8 показаны частотные зависимости S -параметров измеренного транзистора в диапазоне частот до 40 ГГц и его модели.

Из графиков на рис. 8 видно, что измеренные и полученные при помощи модели параметры рассеяния имеют хорошее совпадение с результатами измерений.

Для численной интерпретации полученных результатов имеется возможность сравнить параметры рассеяния транзистора и полученной модели по значениям абсолютной и относительной ошибок как на всём частотном диапазоне, так и для максимального значения у заданной характеристики. На рис. 9 показан пример для $|S_{21}|$ исследуемого транзистора ($V_{ds} = 2,5$ В; $I_{ds} = 15$ мА; $V_{gs} = -0,5$ В), где максимальное значение относительной ошибки составляет 6,4% (на частоте 32,4 ГГц).

Повысить точность экстракции параметров ЭС транзистора, при необходимости, можно использованием встроенных инструментов параметрической оптимизации внутренних элементов.

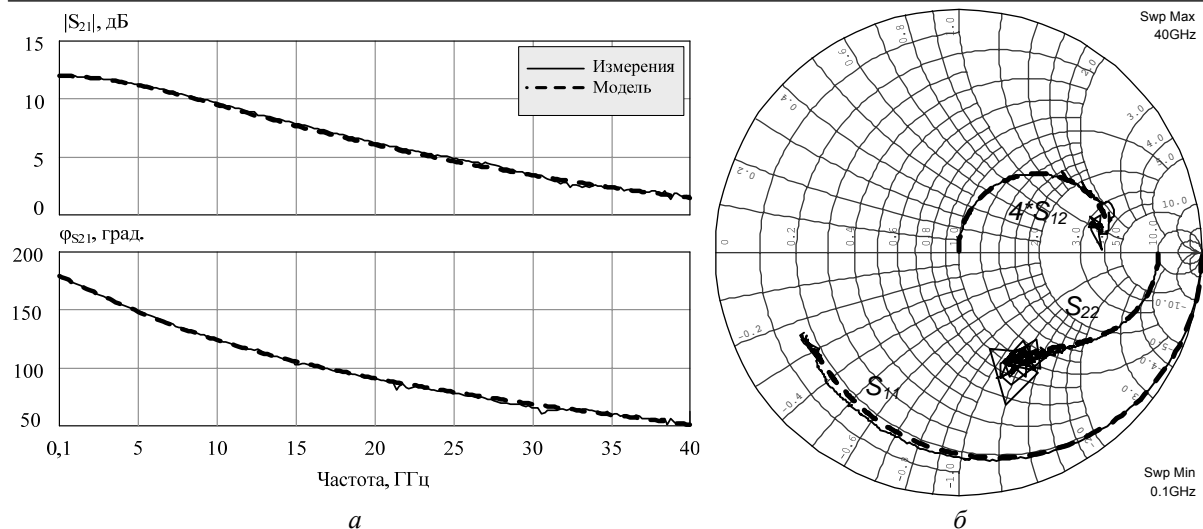


Рис. 8. Частотные зависимости S -параметров измеренного GaAs-pHEMT-транзистора (4×40 мкм) и полученной модели для режима $V_{ds} = 2,5$ В; $I_{ds} = 15$ мА; $V_{gs} = -0,5$ В

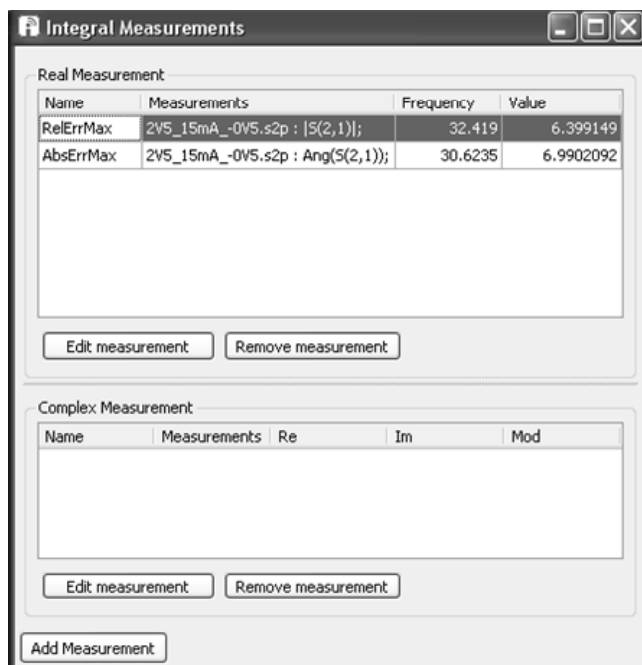


Рис. 9. Диалоговое окно вывода максимальных значений абсолютной и относительной ошибок

Работа выполнялась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по направлениям «Создание электронной компонентной базы» (14.740.11.1261), «Микроэлектроника» (П669, П499, 16.740.11.0092, 14.740.11.1136) и «Проведение исследований коллективами НОЦ по направлению «Микроэлектроника» (14.740.11.0135).

Литература

1. Дмитриенко К.С. Построение табличной нелинейной модели pHEMT-транзистора / К.С. Дмитриенко, Л.И. Бабак // Сб. трудов 19-й Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – 2009. – Т. 1. – С. 119–120.
2. Коколов А.А. Методика построения малосигнальной модели СВЧ-транзистора с высокой подвижностью электронов / А.А. Коколов, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22). – С. 153–156.
3. Автоматизация зондовых измерений параметров рассеяния и вольт-амперных характеристик транзисторов с использованием программной среды Indesys-MS / А.С. Сальников, И.М. Добуш, С.Е. Кошевой, Ф.И. Шеерман // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22). – С. 140–144.

Заключение. Использование разработанного ПО в составе системы INDESYS-MS позволяет:

1. Значительно сократить временные затраты и упростить измерения.
2. Обеспечить оперативную обработку результатов измерений, в частности выполнить исключение паразитных влияний контактных площадок для поиска реальных параметров измеряемого компонента.
3. Произвести экстракцию параметров малосигнальной ЭС транзистора в различных режимах работы по постоянному току.
4. Совместно с дополнительными измерениями получить набор экспериментальных данных для построения шумовых и нелинейных моделей полевых транзисторов.
5. Сохранять результаты измерений в стандартные форматы данных для дальнейшего их использования в коммерческих САПР СВЧ-устройств.

4. Интеллектуальная система автоматизированного проектирования СВЧ-устройств INDESYS / М.А. Песков, С.Ю. Дорофеев, А.С. Барышников и др. // Информационные технологии. – 2010. – №2. – С. 42–48.

5. Сальников А.С. Программы для хранения и статистического анализа результатов измерений СВЧ монолитных интегральных схем / А.С. Сальников, Е.П. Каратаев, И.М. Добуш // Сб. трудов 21-й Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – 2011. – Т. 1. – С. 212–213.

Добуш Игорь Мирославович
Аспирант каф. КСУП ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: igadobush@gmail.com

Степачева Алеся Викторовна
Инженер ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: amaya_89@sibmail.com

Коколов Андрей Александрович
М.н.с. каф. КСУП ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: kokolovaa@gmail.com

Сальников Андрей Сергеевич
М.н.с. каф. КСУП ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: ansalnikov@gmail.com

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

Dobush I.M., Stepacheva A.V., Kokolov A.A., Salnikov A.S., Babak L.I.

Software for measurement automation, deembedding and small-signal FET model extraction

Software modules for on-wafer measurement automation of multibias S-parameters, deembedding, and extraction of MESFET and HEMT small-signal models is developed. The modules are included into software system INDESYS-MS that is integrated with on-wafer measurement setup.

Keywords: automation, on-wafer measurement, deembedding, model extraction, MMIC, MESFET, HEMT.