

УДК 621.382

И.М. Добуш

Исследование методов деэмбеддинга «Open», «Open-Short», «Open-Short-Thru» для зондовых измерений параметров рассеяния элементов СВЧ-монолитных интегральных схем

Приводятся описание и особенности процедуры деэмбеддинга при зондовых измерениях малосигнальных S -параметров элементов СВЧ-монолитных интегральных схем. Представлены математические выражения различных методов деэмбеддинга: «Open», «Open-Short» и «Open-Short-Thru». Проведено сравнение эффективности указанных методов на примере деэмбеддинга тонкопленочного резистора в диапазоне частот до 40 ГГц. Методы реализованы в программе анализа и обработки СВЧ-измерений *DataViewer*.

Ключевые слова: зондовые измерения, S -параметры, деэмбеддинг, «Open», «Open-Short», «Open-Short-Thru», характеристика, СВЧ-монолитная интегральная схема.

Успешная разработка СВЧ-монолитных интегральных схем (МИС) во многом определяется качеством моделей активных (транзисторов, диодов) и пассивных (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и др.) элементов, находящихся в распоряжении проектировщика. Создание адекватных моделей базируется на высокоточных измерениях характеристик элементов МИС. Процесс измерения характеристик элементов СВЧ МИС отличается большой сложностью ввиду высоких рабочих частот и трудности доступа к элементам с весьма малыми размерами.

На данный момент наиболее эффективным инструментом для характеристики (получение набора экспериментальных данных, позволяющих построить математическую модель функционального элемента МИС) монолитных элементов является зондовая станция, которая позволяет проводить измерения параметров элементов МИС непосредственно на полупроводниковой пластине (подложке) практически сразу после её изготовления. По сравнению с характеристикой в коаксиальном тракте измерения с использованием зондовой станции являются более точными, обладают хорошей повторяемостью, позволяют выполнять быстрое, неразрушающее тестирование и отбор элементов МИС на пластине до операций нарезки и помещения в корпус.

Характеризация в соответствии с назначением элементов СВЧ МИС подразделяется на два типа: линейная и нелинейная. Как правило, линейная характеристика используется для описания электрических свойств пассивных компонентов и транзисторов (диодов), работающих в линейном режиме, и основывается на измерении малосигнальных параметров рассеяния (S -параметров). Нелинейная характеристика отражает зависимости характеристик активных элементов от уровня СВЧ-мощности и напряжений питания и основывается на измерении целого комплекса параметров, в частности, вольт-амперных характеристик, большесигнальных S -параметров, X -параметров, мощностных параметров и др.

В настоящей работе основное внимание уделяется одному из важнейших этапов линейной характеристики активных и пассивных элементов СВЧ МИС – процедуре деэмбеддинга. Приводятся описание (определение) процедуры, ее место в общем процессе зондовых измерений на подложке, также даны математические выражения, пригодные для практического использования, нескольких методов деэмбеддинга «Open», «Open-Short» и группы методов «Open-Short-Thru». Проведено сравнение эффективности рассмотренных методов на примере деэмбеддинга тонкопленочного резистора в диапазоне частот до 40 ГГц. Методы реализованы в программе анализа и обработки СВЧ-измерений *DataViewer*, разработанной в Лаборатории интеллектуальных компьютерных систем (ЛИКС) ТУСУРа.

На рис. 1, а приведена блок-схема типовой зондовой установки для линейной характеристики элементов СВЧ МИС, которая включает в себя: зондовую станцию, векторный анализатор цепей (ВАЦ), СВЧ-зонды и кабели, а также источник питания (ИП) для установки режима работы активного элемента.

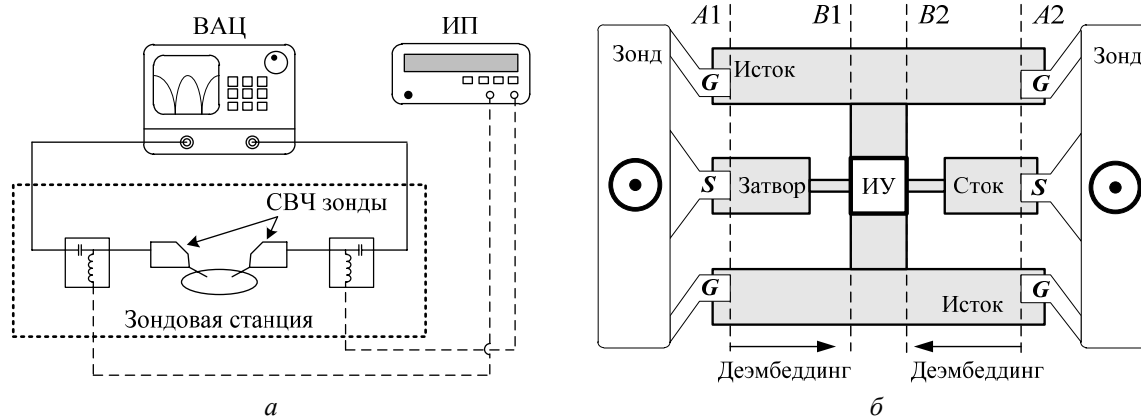


Рис. 1. Блок-схема зондовой установки для измерения S -параметров – a ; эскиз тестовой структуры с ИУ для зондовых СВЧ-измерений на подложке – b

Как и в случае измерений в коаксиальном тракте, перед тем как выполнить зондовые измерения S -параметров испытуемого устройства (ИУ, от англ. «device under test» – DUT), необходимо откалибровать измерительную систему, чтобы учесть систематические ошибки. Систематические составляющие погрешности измерений вызваны неидеальностью электрических характеристик прибора и тестовой установки (рис. 1, a), включая соединительные кабели, разъемы, цепи разделения сигнала, зонды и др. Вычисление характеристик систематических составляющих погрешности производится путем измерения параметров эталонных цепей (калибровочных мер). На практике применяется несколько методов калибровки (LRRM, TRL, LRM, SOLT, SOLR, SOL и др.) для зондовых измерений S -параметров одно-, двух- или многопортовых устройств. Методы калибровки отличаются типами компенсации составляющих систематических погрешностей, видами и количеством используемых калибровочных мер, которые определяют общую точность измерений. Как правило, калибровочные меры размещаются на специализированных керамических подложках (калибровочных пластинах), которые в свою очередь изготавливаются и коммерчески распространяются фирмами-производителями оборудования для СВЧ-зондовых измерений (например, Cascade Microtech, США; GGB Industries, США).

После завершения процесса калибровки на калибровочной пластине плоскости отсчета (опорные плоскости) смещаются к наконечникам СВЧ-зондов – плоскости $A1$ – $A2$ (рис. 1, b). Зачастую плоскости отсчета ИУ не совпадают с плоскостями калибровки. В качестве примера на рис. 1, b приведен эскиз тестовой структуры для СВЧ-измерений на подложке. Помимо ИУ (в данном случае полевого транзистора, плоскости $B1$ – $B2$), тестовая структура содержит контактные площадки и подводящие линии для подключения зондов, которые изменяют результаты измерений и, следовательно, являются паразитными элементами. Как правило, геометрические размеры паразитных элементов сопоставимы или превышают размеры ИУ, поэтому они могут оказывать существенное влияние на его характеристики в СВЧ- и КВЧ-диапазонах. В связи со сказанным влияние контактных площадок и подводящих линий должно быть исключено из результатов измерений, в англоязычной литературе данная процедура называется «on-wafer de-embedding» [1–7 и др.]. В русскоязычной литературе идентичный термин отсутствует, поэтому для сохранения специфики области исследований и краткости перевода будем использовать транслитерацию данного термина – «деэмбединг».

Таким образом, суть деэмбединга на пластине состоит в том, что из параметров тестовой структуры с ИУ «вычитаются» параметры паразитных элементов – это эквивалентно сдвигу плоскостей отсчета $A1$ – $A2$ в плоскости $B1$ – $B2$ (см. рис. 1, b). В свою очередь параметры паразитных элементов находятся путем электромагнитного (ЭМ) моделирования либо с помощью дополнительных измерений, так называемых стандартов деэмбединга – специальных тестовых структур (от англ. «de-embedding structures», «de-embedding dummy elements» или «de-embedding patterns»). Получение параметров паразитных элементов расчетным путем требует высокой точности ЭМ-моделирования и детального знания характеристик материала подложки, что не всегда возможно. В случае же измерений стандарты для деэмбединга изготавливаются на одной пластине и в тех же топологических слоях, что и ИУ, это позволяет наиболее полно учесть особенности технологического процесса при исключении паразитных элементов.

Обзор литературы [1–7 и др.] показывает, что существует множество методов деэMBEDдинга, которые различаются количеством используемых структур, способом представления паразитных параметров (в сосредоточенном или распределенном виде), а также диапазоном частот, в котором эти методы корректно работают. В настоящей работе представлены краткое описание, алгоритмы и результаты исследований некоторых методов деэMBEDдинга для пассивных и активных элементов СВЧ МИС: «Open» [1], «Open-Short» [2] и семейство методов «Open-Short-Thru» [3–7]. Условное наименование указанных методов деэMBEDдинга соответствует англоязычным терминам используемых стандартов: холостой («Open»), короткозамкнутый («Short») и перемычка («Thru»).

Метод деэMBEDдинга «Open» был предложен P.J. Wijnen и др. в 1987 г. [1], суть метода заключается в том, что при использовании одного стандарта «Open» (рис. 2, а) возможно исключить параллельные паразитные элементы (проводимости Y_1, Y_2, Y_3) эквивалентной схемы (ЭС), представленной на рис. 2, б. Для этого необходимо провести измерения S -параметров тестовой структуры с ИУ (см. рис. 1, б) и стандарта «Open» (см. рис. 2, а), а затем перевести их в Y -параметры.

Далее согласно выражению (1) нетрудно найти Y -параметры ИУ:

$$Y_{DUT} = Y_T - Y_O, \quad (1)$$

где Y_{DUT}, Y_T и Y_O – Y -параметры ИУ, тестовой структуры с ИУ и стандарта «Open» соответственно. Согласно результатам, приводимым исследователями, рассмотренный метод рекомендуется использовать для элементов, работающих на частотах не более 20 ГГц.

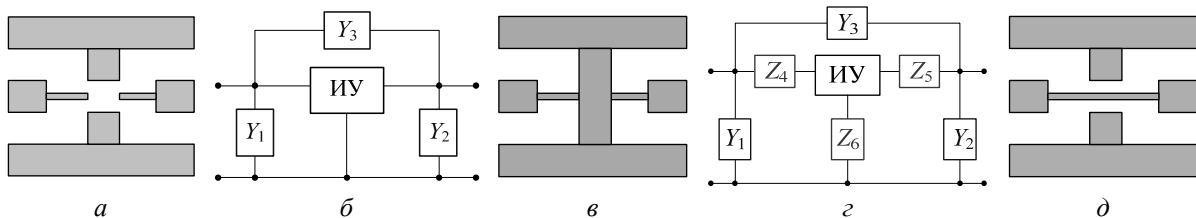


Рис. 2. Топологии стандартов деэMBEDдинга: «Open» – а, «Short» – в, «Thru» – д; эквивалентные схемы методов деэMBEDдинга: «Open» – б и «Open-Short» – з

Метод деэMBEDдинга «Open-Short» был развит Kooleen и др. в 1991 г. [2] и применяется до частот порядка 30 ГГц. Его отличие от предыдущего метода состоит в том, что помимо исключения параллельных паразитных элементов Y_1, Y_2, Y_3 (вызванных паразитными связями между проводниками через подложку) могут быть исключены и последовательные паразитные элементы Z_4, Z_5, Z_6 (вызванные в свою очередь контактным сопротивлением и потерями в подводящих линиях). ЭС ИУ с паразитными элементами изображена на рис. 2, з. Для реализации метода «Open-Short» нужно измерить S -параметры тестовой структуры с ИУ (см. рис. 1, б) и двух стандартов «Open» (см. рис. 2, а) и «Short» (рис. 2, в). После этого параметры ИУ находятся в два этапа:

1. Измеренные S -параметры следует перевести в Y -параметры и из Y -параметров тестовой структуры с ИУ и стандарта «Short» вычесть параметры стандарта «Open» согласно (2):

$$Y_{TO} = Y_T - Y_O, \quad Y_{SO} = Y_S - Y_O, \quad (2)$$

где Y_T, Y_O и Y_S – Y -параметры тестовых структур с ИУ, «Open» и «Short» соответственно.

2. Полученные Y -параметры (Y_{TO} и Y_{SO}) перевести в Z -параметры и подставить в (3):

$$Z_{DUT} = Z_{TO} - Z_{SO}, \quad (3)$$

где Z_{DUT} – Z -параметры ИУ.

Семейство методов деэMBEDдинга «Open-Short-Thru». Использование дополнительной структуры «Thru» (рис. 2, д) совместно со стандартами «Open» (см. рис. 2, а) и «Short» (см. рис. 2, в) привело к созданию целой группы методов деэMBEDдинга [3–7 и др.], некоторые из них приведены ниже.

Метод «Open-Short-Thru» [3] предложен H. Cho и D.E. Burk в 1991 г. и был использован для исключения паразитных элементов из результатов зондовых измерений биполярного транзистора. На рис. 3, а показана ЭС тестовой структуры с ИУ для метода деэMBEDдинга из работы [3]. Используя результаты измерений параметров рассеяния тестовой структуры с ИУ (см. рис. 1, б) и трех стандартов (см. рис. 2, а, в, д) можно найти параметры ИУ согласно следующему алгоритму:

1. Измеренные S -параметры тестовой структуры с ИУ и стандарта «Open» нужно перевести в Y -параметры и подставить в следующие выражения:

$$G_1 = Y_{O11} + Y_{O12}, \quad G_2 = Y_{O22} + Y_{O12}, \quad G_3 = -Y_{O12}, \quad (4)$$

$$Y_{11} = Y_{T11} - G_1, \quad Y_{22} = Y_{T22} - G_2, \quad (5)$$

где Y_O и Y_T – Y -параметры стандарта «Open» и тестовой структуры с ИУ, соответственно.

2. На данном этапе находятся последовательные паразитные элементы Z_1, Z_2, Z_3 (6), Y -параметры (5) также необходимо перевести в Z -параметры и подставить в (7).

$$Z_1 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{Y_{Th12}} + \frac{1}{Y_{S11}} - \frac{1}{Y_{S22}} \right),$$

$$Z_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{Y_{Th12}} - \frac{1}{Y_{S11}} + \frac{1}{Y_{S22}} \right), \quad (6)$$

$$Z_3 = \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{1}{Y_{Th12}} + \frac{1}{Y_{S11}} + \frac{1}{Y_{S22}} \right),$$

$$Z_{Cor11} = Z_{11} - Z_1 - Z_3, \quad Z_{Cor12} = Z_{12} - Z_3,$$

$$Z_{Cor21} = Z_{21} - Z_3, \quad Z_{Cor22} = Z_{22} - Z_2 - Z_3, \quad (7)$$

где Y_{Th} и Y_S – Y -параметры стандартов «Thru» и «Short» соответственно.

3. Далее Z -параметры (7) переводятся в Y -параметры и подставляются в (8) для расчета параметров ИУ:

$$Y_{DUT11} = Y_{Cor11} - G_3, \quad Y_{DUT12} = Y_{Cor12} + G_3,$$

$$Y_{DUT21} = Y_{Cor21} + G_3, \quad Y_{DUT22} = Y_{Cor22} - G_3, \quad (8)$$

где Y_{DUT} – Y -параметры ИУ.

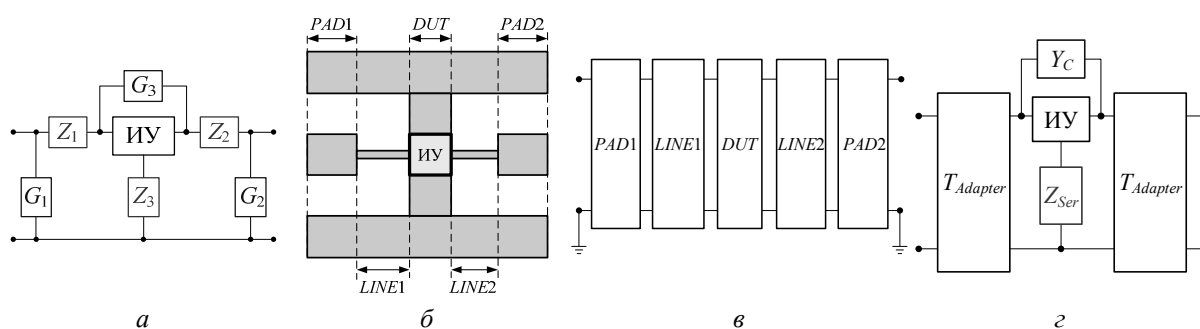


Рис. 3. Эквивалентные схемы метода деэмбеддинга «Open-Short-Thru»: работы [3–5] – *a*; каскадное представление тестовой структуры с ИУ – *б*; работа [6] – *в*, работа [7] – *г*

Метод «Open-Short-Thru» [4] описан Е.Р. Vandamme и др. в 2001 г., является улучшенным методом Н. Cho [3], при этом использует аналогичные тестовые структуры и ЭС (рис. 3, *a*). Методика расчета включает следующие этапы:

1. Значения параллельных паразитных элементов ЭС G_1 и G_2 находятся из (4), G_3 записывается как (9):

$$G_3 = \left(-\frac{1}{Y_{O12}} + \frac{1}{Y_{Th12}} \right)^{-1}. \quad (9)$$

2. Далее находятся последовательные паразитные элементы Z_1, Z_2, Z_3 :

$$Z_1 = \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{1}{Y_{Th12}} + \frac{1}{Y_{S11} - G_1} - \frac{1}{Y_{S22} - G_2} \right),$$

$$Z_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{Y_{Th12}} - \frac{1}{Y_{S11} - G_1} + \frac{1}{Y_{S22} - G_2} \right), \quad (10)$$

$$Z_3 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{Y_{Th12}} + \frac{1}{Y_{S11} - G_1} + \frac{1}{Y_{S22} - G_2} \right).$$

3. Из параметров тестовой структуры с ИУ поочередно вычитаются найденные выше паразитные элементы:

$$Y_A = Y_T - \begin{bmatrix} G_1 & 0 \\ 0 & G_2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$Z_B = Z_A - \begin{bmatrix} Z_1 + Z_3 & Z_3 \\ Z_3 & Z_2 + Z_3 \end{bmatrix},$$

где $Z_A = Y_A^{-1}$.

4. На заключительном этапе находятся Y -параметры ИУ:

$$Y_{DUT} = Y_B - \begin{bmatrix} G_3 & -G_3 \\ -G_3 & G_3 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $Y_B = Z_B^{-1}$.

Метод «Open-Short-Thru» [5] был разработан С. Duff и R. Sloan в 2002 г. и применен для деэмбеддинга S -параметров GaAs pHEMT-транзистора в диапазоне частот до 40 ГГц. Метод использует ту же ЭС (см. рис. 3, а) и включает следующие действия:

1. Параллельные паразитные элементы ЭС G_1, G_2, G_3 находятся из [4] (см. метод выше). Последовательные элементы Z_1, Z_2, Z_3 записываются как

$$Z_1 = Z_{S11} - Z_{S12}, \quad Z_2 = Z_{S22} - Z_{S21}, \quad Z_3 = Z_{S12}. \quad (13)$$

2. Подставляя полученные паразитные элементы ($G_1, G_2, G_3, Z_1, Z_2, Z_3$) в (11) и (12), нетрудно рассчитать Y -параметры ИУ.

Метод «Open-Short-Thru» [6]. Рассмотренные ранее методы деэмбеддинга основаны на представлении контактных площадок и подводящих линий в виде паразитных сосредоточенных элементов эквивалентной цепи, подобное допущение приводит к неточностям при расчетах в мм-диапазоне волн [5–7], так как на этих частотах преобладает распределенный характер паразитных элементов тестовой структуры.

Метод, описанный в [6], основан на представлении тестовой структуры с ИУ (рис. 3, б) в виде каскадного соединения четырехполюсников (рис. 3, в) и не требует построения эквивалентной схемы на основе паразитных сосредоточенных элементов. Тестовую структуру (рис. 3, б) нетрудно представить, используя $ABCD$ -параметры входящих в неё четырехполюсников:

$$A_T = A_{PAD1} \cdot A_{LINE1} \cdot A_{DUT} \cdot A_{LINE2} \cdot A_{PAD2}, \quad (14)$$

где $A_T, A_{PAD}, A_{LINE}, A_{DUT}$ – $ABCD$ -матрицы тестовой структуры с ИУ, контактных площадок, подводящей линии и ИУ соответственно.

Согласно [6] процедура деэмбеддинга состоит из следующих этапов:

1. Расчет $ABCD$ -параметров контактных площадок:

$$A_{PAD1} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{PAD} \\ Y_{PAD} & 1 + Z_{PAD} \cdot Y_{PAD} \end{bmatrix}, \quad A_{PAD2} = \begin{bmatrix} 1 + Z_{PAD} \cdot Y_{PAD} & Z_{PAD} \\ Y_{PAD} & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где $Y_{PAD} = Y_{O11} + Y_{O12}, Z_{PAD} = Z_{D11} - Z_{D12}, Z_D = Y_D^{-1}, Y_D = Y_S - Y_O, Y_S$ – Y -параметры стандарта «Short»; Y_O – Y -параметры стандарта «Open».

2. Расчет параметров подводящих линий:

$$A_{LINE} = A_{PAD1}^{-1} \cdot A_{Th} \cdot A_{PAD2}^{-1}, \quad (16)$$

$$Z_C = \pm Z_0 \cdot \sqrt{\frac{(1 + S_{LINE11})^2 - (S_{LINE21})^2}{(1 - S_{LINE11})^2 - (S_{LINE21})^2}},$$

$$\gamma = -\frac{1}{l} \cdot \ln \left(\left(\frac{1 - (S_{LINE11})^2 + (S_{LINE21})^2}{2 \cdot S_{LINE21}} \pm K \right)^{-1} \right),$$

$$K = \sqrt{\frac{(1 - (S_{LINE21})^2 + (S_{LINE11})^2)^2 - (2 \cdot S_{LINE11})^2}{(2 \cdot S_{LINE21})^2}},$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_C \cdot \sinh \gamma l \\ \frac{1}{Z_C} \cdot \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где A_{Th} – $ABCD$ -параметры стандарта «Thru»; Z_C , l , γ , S_{LINE} – характеристический импеданс, длина, постоянная распространения и S -параметры подводящей линии стандарта «Thru» (без контактных площадок) соответственно.

Подставляя рассчитанные из (16) параметры подводящей линии Z_C и γ , а также длины подводящих линий (l_1 и l_2) для тестовой структуры с ИУ (рис. 3, б) в выражение (17), получаем $ABCD$ -параметры обеих подводящих линий A_{LINE1} и A_{LINE2} .

3. Расчет $ABCD$ -параметров ИУ:

$$A_{DUT} = A_{IN}^{-1} \cdot A_T \cdot A_{OUT}^{-1}, \quad (18)$$

где $A_{IN} = A_{PAD1} \cdot A_{LINE1}$, $A_{OUT} = A_{LINE2} \cdot A_{PAD2}$.

Метод «Open-Short-Thru» [7], описанный J.Y. Kim в 2012 г., основан на представлении тестовой структуры с ИУ (см. рис. 1, б) в виде комбинированной ЭС, сочетающей распределенные и сосредоточенные паразитные элементы, см. рис. 3, з. Предложенная в данной работе ЭС состоит из двух одинаковых входных и выходных блоков, так называемых «адаптеров», описываемых S - или T -параметрами ($S_{Adapter}$ или $T_{Adapter}$), а также двумя паразитными элементами – последовательным (Z_{Ser}) и параллельным (Y_C). Процедура деэмбеддинга заключается в следующем:

1. Проводится расчет параметров адаптеров:

$$S_{Adapter11} = S_{Adapter22} = \frac{S_{Th11} + S_{Th22}}{2 + S_{Th21} + S_{Th12}}, \quad (19)$$

$$S_{Adapter12} = S_{Adapter21} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (S_{Th12} + S_{Th21}) \cdot \left(1 - (S_{Adapter11})^2\right)},$$

где S_{Th} – S -параметры стандарта «Thru».

2. Далее параметры адаптеров исключаются из параметров тестовых структур с ИУ и «Short»:

$$T_{TA} = T_{Adapter}^{-1} \cdot T_T \cdot T_{Adapter}^{-1}, \quad (20)$$

$$T_{SA} = T_{Adapter}^{-1} \cdot T_S \cdot T_{Adapter}^{-1}, \quad (21)$$

где T_T , T_S – T -параметры тестовой структуры с ИУ и стандарта «Short» соответственно.

3. Вычитание последовательного паразитного элемента:

$$Z_{TASer} = Z_{TA} - \begin{bmatrix} Z_{Ser} & Z_{Ser} \\ Z_{Ser} & Z_{Ser} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

где $Z_{Ser} = Z_{SA12}$.

4. Расчет параллельного паразитного элемента (23)–(25) и параметров ИУ (26):

$$T_{OA} = T_{Adapter}^{-1} \cdot T_O \cdot T_{Adapter}^{-1}, \quad (23)$$

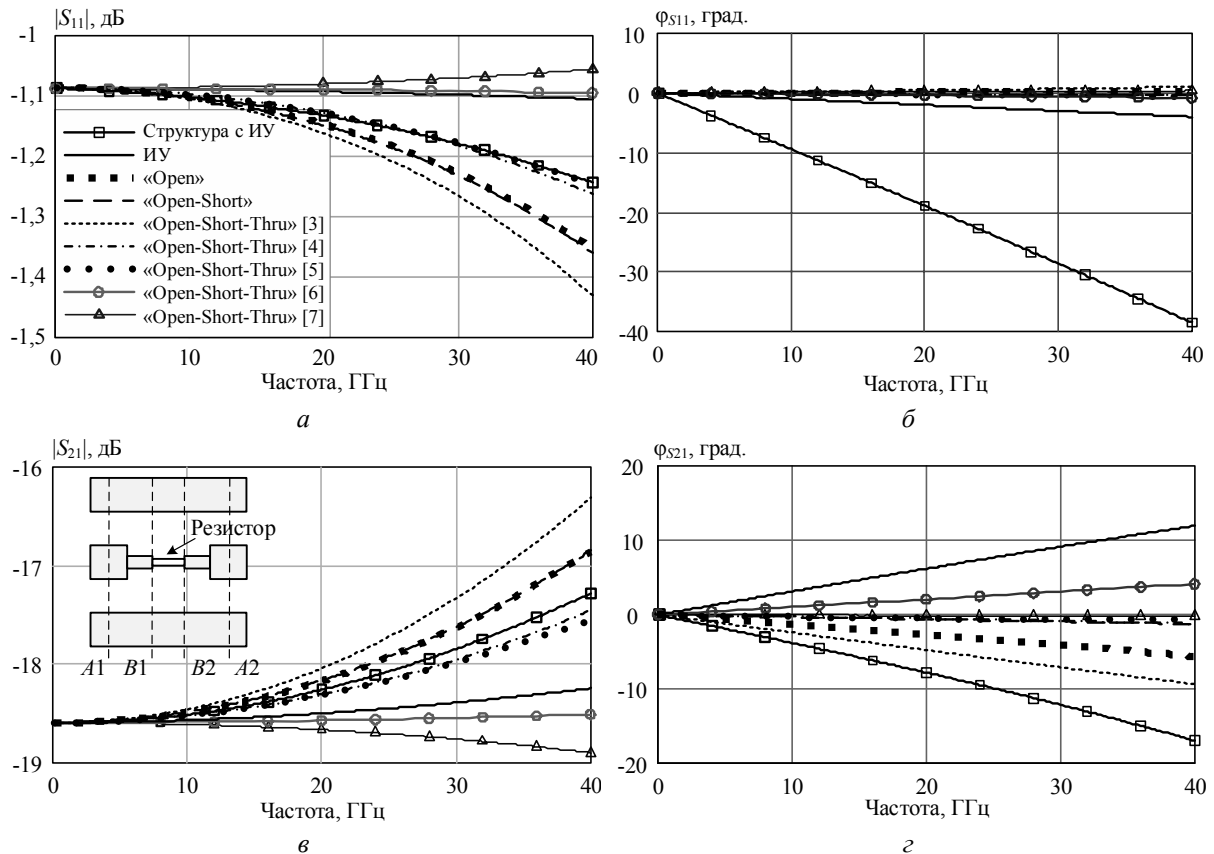
$$Z_{OASer} = Z_{OA} - \begin{bmatrix} Z_{Ser} & Z_{Ser} \\ Z_{Ser} & Z_{Ser} \end{bmatrix}, \quad (24)$$

$$Y_C = -Y_{OASer12}, \quad (25)$$

$$Y_{DUT} = Y_{TASer} - \begin{bmatrix} Y_C & -Y_C \\ -Y_C & Y_C \end{bmatrix}, \quad (26)$$

где T_O – T -параметры стандарта «Open»; Y_{DUT} – Y -параметры ИУ.

Пример: деэмбеддинг тонкопленочного резистора. Сравнение эффективности рассмотренных методов покажем на примере деэмбеддинга тонкопленочного резистора с размерами 10×30 мкм и номиналом 750 Ом на постоянном токе. Исходные S -параметры тестовой структуры с ИУ (рис. 4, в) и стандартов «Open», «Short» и «Thru» были получены в программе ЭМ-моделирования в диапазоне частот до 40 ГГц. Стоит отметить, что использование ЭМ-моделирования является намеренным, так как программа позволяет получить S -параметры ИУ в произвольных плоскостях отсчета. Согласно рис. 4, в плоскости $A1$ – $A2$ соответствует тестовой структуре с ИУ для зондовых измерений, плоскости $B1$ – $B2$ – ИУ (резистор) без паразитных элементов, параметры последнего являются «эталоном» и используются для верификации всех методов деэмбеддинга.

Рис. 4. Частотные зависимости S -параметров тонкопленочного резистора

На рис. 4 показаны частотные зависимости S -параметров тестовой структуры с резистором (обозначено «структура с ИУ»), резистора без паразитных элементов («ИУ») и резистора с применением различных методов деэмбеддинга. Из графиков на рис. 4 видно, что ни один из исследуемых методов деэмбеддинга во всем диапазоне частот (до 40 ГГц) полностью не повторяет характеристик эталонного резистора, при этом с ростом частоты значения ошибок методов увеличиваются. В таблице приведены значения отклонений S -параметров от эталонного ИУ для различных методов деэмбеддинга на частоте 40 ГГц.

Из таблицы видно, что наиболее близкие к эталонным результатам показывают методы деэмбеддинга «Open-Short-Thru» из работ [6] и [7]. В то же время более простые методы «Open» и «Open-Short», использующие меньшее количество стандартов и предназначенные изначально для более низких частот, показывают сопоставимые результаты с методами «Open-Short-Thru» [4, 5], а в некоторых случаях являются более точными – в сравнении с «Open-Short-Thru» [3].

Значения отклонений S -параметров от эталонного резистора на частоте 40 ГГц

Метод деэмбеддинга	$\delta(S_{11})$, %	$\Delta(\varphi_{S11})$, град	$\delta(S_{21})$, %	$\Delta(\varphi_{S21})$, град
Структура с ИУ (без деэмбеддинга)	2,3	34,4	11,5	28,8
«Open»	3,4	4,3	17,5	17,5
«Open-Short»	3,4	3,6	17	13
«Open-Short-Thru» [3]	4,5	5	25	21
«Open-Short-Thru» [4]	2,3	3,5	10	13
«Open-Short-Thru» [5]	2,3	3,5	8	12,5
«Open-Short-Thru» [6]	0,1	3,2	3,3	7,8
«Open-Short-Thru» [7]	0,6	4,3	7,3	12

Для эффективного использования рассмотренные (и др.) методы деэмбеддинга были реализованы в программе анализа и обработки СВЧ-измерений *DataViewer* [8], разработанной в ЛИКС ТУ-СУРа. Созданное программное обеспечение успешно применяется в процессе построения моделей активных и пассивных элементов СВЧ МИС [9–12].

Заключение. В настоящей работе описан один из важнейших этапов процесса построения моделей элементов СВЧ МИС – процедура деэмбеддинга; представлены несколько практических методик, вошедших в программу анализа и обработки СВЧ-измерений *DataViewer*, разрабатываемую коллективом ЛИКС ТУСУРа; проведено сравнение эффективности и верификация методов деэмбеддинга на примере тонкопленочного резистора в диапазоне частот до 40 ГГц.

Литература

1. Wijnen P.J. A new straightforward calibration and correction procedure for «on-wafer» high frequency S-parameter measurements (45 MHz–18 GHz) / P.J. Wijnen, H.R. Claessen, E.A. Wolsheimer // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits Technology Meeting. – Minneapolis, 1987. – P. 70–73.
2. Koolen M.C.A.M. An improved de-embedding technique for on-wafer high-frequency characterization / M.C.A.M. Koolen, J.A.M. Geelen, M.P.J.G. Versleijen // IEEE Bipolar Circuits and Technology Meeting. – Minneapolis, 1991. – P. 188–191.
3. Cho H. A three-step method for the de-embedding of high-frequency S-parameter measurements / H. Cho, D.E. Burk // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1991. – Vol. 38. – P. 1371–1375.
4. Vandamme E.P. Improved three-step de-embedding method to accurately account for the influence of pad parasitics in silicon on-wafer RF test-structures / E.P. Vandamme, D.M.M.P. Schreurs, G. Van Dinther // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2001. – Vol. 48. – P. 737–742.
5. Duff C. Lumped Equivalent Circuit De-Embedding of GaAs Structures / C. Duff, R. Sloan // 10th IEEE International Symposium on Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications. EDMO 2002. – Manchester, 2002. – P. 211–217.
6. A Cascade Open-Short-Thru (COST) De-Embedding Method for Microwave On-Wafer Characterization and Automatic Measurement / M.H. Cho, G.W. Huang, C.S. Chiu, K.M. Chen, A.S. Peng, Y.M. Teng // IEICE Transactions. – 2005. – P. 845–850.
7. Kim J.Y. A «Thru-Short-Open» De-embedding Method for Accurate On-Wafer RF Measurements of Nano-Scale MOSFETs / J.Y. Kim, M.K. Choi, S. Lee // Journal of Semiconductor Technology and Science. – 2012. – Vol. 12. – P. 53–58.
8. Программа анализа и обработки СВЧ-измерений *DataViewer* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ellics.com>, свободный (дата обращения: 30.05.2014).
9. Добуш И.М. Построение моделей пассивных элементов и автоматизированное проектирование СВЧ-монокристаллических усилителей с учетом влияния температуры: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. – Томск: ТУСУР, 2012. – 199 с.
10. Экспериментальное исследование и моделирование GaN НЕМТ Ка-диапазона на подложке SiC / А.А. Коколов, Н.А. Торхов, И.М. Добуш, Л.И. Бабак // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8–3. – С. 116–119.
11. Экспериментальное исследование и построение моделей пассивных компонентов СВЧ-монокристаллических интегральных схем с учетом технологического разброса параметров / А.С. Сальников, И.М. Добуш, Л.И. Бабак, Н.А. Торхов // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2 (26). – С. 113–118.
12. Горяинов А.Е. Построение параметрических моделей пассивных компонентов СВЧ-монокристаллических интегральных схем с использованием программы Extraction-P / А.Е. Горяинов, И.М. Добуш, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2 (26). – С. 98–103.

Добуш Игорь Мирославович

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник лаб. интеллектуальных компьютерных систем ТУСУРа
Тел. (раб.): +7-913-827-52-91
Эл. почта: igadobush@gmail.com

Dobush I.M.

Investigation of «Open», «Open-Short», «Open-Short-Thru» de-embedding methods for on-wafer measurements of S-parameters of MMIC Elements

This work presents general introduction and features of the de-embedding concept for on-wafer measurements of S-parameters of MMIC Elements. This paper shows «Open», «Open-Short» and «Open-Short-Thru» de-embedding equations. As an example, the de-embedding up to 40 GHz of MMIC thin-film resistor is demonstrated. These methods are implemented in the *DataViewer* software tool.

Keywords: on-wafer measurements, S-parameters, de-embedding, Open, Open-Short, Open-Short-Thru, characterization, MMIC.