УДК 621.382

А.С. Сальников, И.М. Добуш, А.Е. Горяинов, Л.И. Бабак

Построение параметрической модели монолитного тонкопленочного резистора на основе СВЧ-измерений и электромагнитного моделирования

Представлена методика построения параметрических моделей пассивных элементов СВЧ-монолитных интегральных схем (МИС), позволяющая снизить количество измеряемых тестовых структур. Принципиальной особенностью методики является использование при построении модели как непосредственно измеренных параметров рассеяния реальных тестовых элементов, так и рассчитанных в результате электромагнитного (ЭМ) анализа параметров «виртуальных» элементов. При этом электрофизические параметры материалов, необходимые для ЭМ моделирования, находятся на основе экстракции простых эквивалентных схем измеренных элементов и анализа физических уравнений. Методика рассмотрена на примере построения параметрической модели тонкопленочного резистора для GaAs МИС.

Ключевые слова: GaAs МИС, тонкопленочный резистор, параметрическая модель, ЭМ-моделирование.

СВЧ-монолитные интегральные схемы (МИС) находят широкое применение в современной радиоэлектронной аппаратуре. Для проектирования СВЧ МИС важно иметь точные модели пассивных и активных элементов. При этом особенностью монолитной технологии является возможность варьирования конструктивных параметров элемента, например геометрических размеров. Поэтому разрабатываемые модели пассивных элементов должны быть параметрическими (масштабируемыми), т.е. отражать зависимости характеристик элемента от конструктивных параметров.

На данный момент предложено достаточно большое количество видов параметрических моделей пассивных элементов СВЧ МИС и подходов к их построению. В литературе приводятся модели, выведенные исходя из теоретического описания физики работы элементов [1]. Также используются методы многомерной аппроксимации для описания интересующей характеристики моделируемого элемента (поведенческая модель) [2–4]. Имеются работы, в которых характеристики элементов аппроксимируются в многомерном пространстве с помощью искусственных нейронных сетей или регрессионных методов моделирования [5].

Широко распространены модели пассивных элементов СВЧ МИС в виде эквивалентных схем (ЭС), значения элементов которых зависят от конструктивных параметров (параметрические ЭС-модели). Достоинствами ЭС-моделей являются простота, быстродействие и удобство встраивания практически в любую САПР, а также то, что элементы ЭС могут отражать конкретные физические параметры моделируемого элемента.

Исходными данными для построения параметрических моделей является сетка элементов, т.е. набор элементов одного вида с разными значениями конструктивных параметров. В различных работах в качестве исходных данных используются результаты экспериментальных измерений либо электромагнитного (ЭМ) моделирования пассивных элементов на такой сетке. Первый способ [6–8] является наиболее точным, но дорогостоящим, так как необходимо провести проектирование тестовых структур и затем осуществить технологический процесс изготовления элементов. Кроме того, для построения точной модели требуется значительное количество элементов, и сетка элементов занимает достаточно много места на полупроводниковой пластине. Это ведёт к уменьшению числа рабочих («полезных») структур МИС на той же пластине и повышению их стоимости.

В связи со сказанным чаще используется второй способ, при котором вначале проводится ЭМ-моделирование, а затем результат верифицируется на нескольких реально изготавливаемых элементах [9–11]. Недостатком способа является отсутствие гарантии достаточной точности моделей элементов при промежуточных значениях конструктивных параметров. Кроме того, весьма трудоёмким является процесс определения данных для ЭМ-моделирования (конструкции и состава физической структуры, учитываемых факторов, значений электрофизических параметров материалов – полу-

проводников, диэлектриков, резистивных и проводящих пленок и т.д.) для совпадения результатов ЭМ-анализа и измерений. Экспериментальное определение электрофизических параметров требует дополнительных непростых измерений, но не всегда приводит к успеху из-за сложностей физической структуры и явлений в пассивных элементах. Поэтому часто используется подбор параметров физической структуры и материалов методом проб при многократном выполнении ЭМ-моделирования. Такой подход является нецеленаправленным, трудоёмким и требует много времени.

В статье предлагается методика построения параметрических моделей пассивных элементов СВЧ МИС, использующая для получения исходных данных как экспериментальные измерения, так и результаты ЭМ-моделирования. При этом использование небольшого числа тестовых элементов приводит к уменьшению стоимости их изготовления. Повышение точности параметрических моделей в промежуточных конструктивных состояниях, а также более простое определение параметров физической структуры и материалов обеспечивается путём применения в качестве промежуточного звена между измерениями и ЭМ-моделированием простых ЭС-моделей пассивных элементов.

Описание предлагаемой методики. В настоящей работе построение параметрической модели в виде ЭС осуществляется с использованием методики [12] на основе известных *S*-параметров тестовых элементов в заданном диапазоне частот. Однако, как уже отмечалось, для уменьшения стоимости целесообразно изготавливать небольшое число «узловых» тестовых элементов. Если в этих условиях использовать только измеренные данные тестовых элементов, применение методики [12] приведет к значительному возрастанию погрешности моделей в промежуточных конструктивных состояниях.

С целью решения этой проблемы в предлагаемой нами методике получение большего объема данных для построения моделей обеспечивается путем расчета *S*-параметров дополнительных «виртуальных» тестовых элементов на основе ЭМ-анализа. Для «виртуальных» элементов используются другие (отличные от реальных «узловых» элементов) конструктивные состояния, в результате получается более частая сетка реальных и «виртуальных» тестовых элементов. Её использование совместно с методикой [12] позволяет построить более точные параметрические модели пассивных элементов СВЧ МИС во всем диапазоне изменения конструктивных параметров.

Принципиальной особенностью предлагаемой методики является то, что данные (электрофизические параметры) для ЭМ-анализа «виртуальных» элементов определяются из результатов измерений *S*-параметров небольшого числа реально изготовленных тестовых элементов. С целью получения таких данных используется экстракция простых ЭС реальных элементов по измерениям *S*-параметров. Изготовленные «узловые» тестовые элементы используются также для верификации параметрической модели.

Таким образом, предлагаемая методика построения параметрических моделей пассивных элементов СВЧ МИС с использованием измерений и ЭМ-анализа состоит из следующих этапов:

1. Измерение параметров рассеяния изготовленных «узловых» тестовых элементов на редкой сетке конструктивных состояний (на практике это могут быть всего 3–5 элементов).

2. Построение на основе результатов измерения *S*-параметров ЭС-моделей тестовых элементов в «узловых» конструктивных состояниях.

3. Расчёт на основе полученных значений элементов ЭС и анализа теоретических уравнений, описывающих физические процессы в пассивных компонентах МИС, электрофизических параметров материалов и конструктивных параметров, необходимых для ЭМ-моделирования (диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь диэлектриков, сопротивление металлизации проводников, толщина диэлектрических и металлических пленок и т.п.).

4. Расчёт в программе ЭМ-моделирования *S*-параметров «виртуальных» тестовых элементов на более частой сетке элементов.

5. Построение параметрической модели элемента в виде ЭС на основе суммарной сетки реальных и «виртуальных» элементов, её верификация по измеренным *S*-параметрам реальных тестовых элементов.

В общем виде представленная методика применима к различным видам сосредоточенных пассивных элементов СВЧ МИС. В настоящей статье рассматривается построение на её основе модели тонкопленочного резистора.

Построение параметрической модели тонкопленочного резистора. Тонкопленочный резистор на основе силицида вольфрама (WSi) в технологии GaAs МИС изготавливается методом вакуумного испарения. Контакт к резистору обеспечивается осаждением двух контактных площадок в

процессе нанесения основной металлизации схемы – толстой пленки золота (гальваники). Между контактными площадками из золота и резистивным материалом имеются переходные области, обладающие некоторым сопротивлением. Природа этого сопротивления, по-видимому, связана с образованием сплавов, изменением структуры материала или загрязнениями [13]. Конструкция резистора представлена на рис. 1.

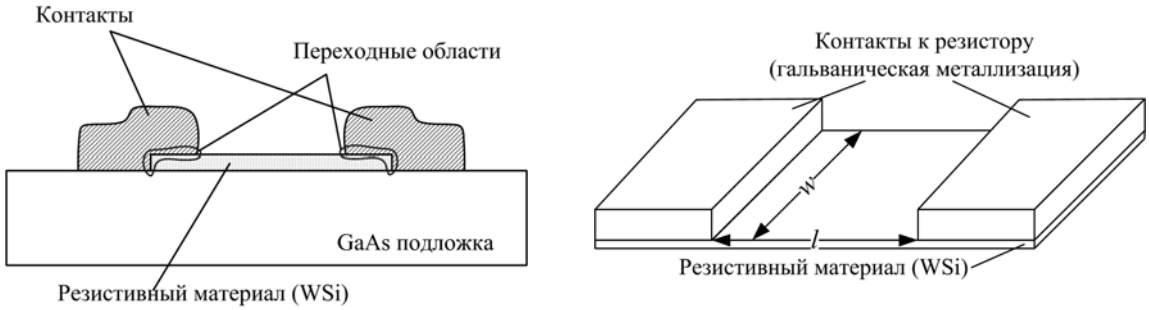
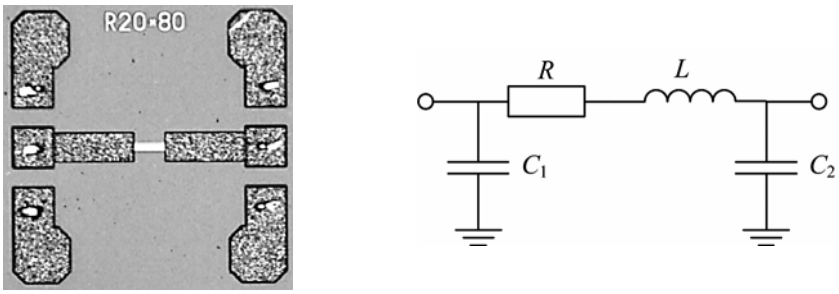


Рис. 1. Структура тонкопленочного резистора на основе WSi

Конструктивными параметрами для резистора являются длина l и ширина w (см. рис. 1), они выступают в качестве входных параметров модели. Требуется построить параметрическую модель резистора в диапазоне изменения w от 15 до 60 мкм и l от 20 до 100 мкм.

Изготовление тестовых резисторов и построение их эквивалентных схем. На тестовой пластине (GaAs подложке) были изготовлены резисторы четырёх типоразмеров: 15×100, 20×80, 30×30 и 60×60 мкм (условно обозначаются R15×100, R20×80, R30×30 и R60×60). Фотография резистора R20×80 приведена на рис. 2, *а*.



а *б*

Рис. 2. Фотография (*а*) и структура ЭС (*б*) тонкоплёночного резистора

На рис. 3 черными кружками показаны конструктивные состояния в пространстве параметров w и l, соответствующие изготовленным резисторам («узловым» тестовым элементам).

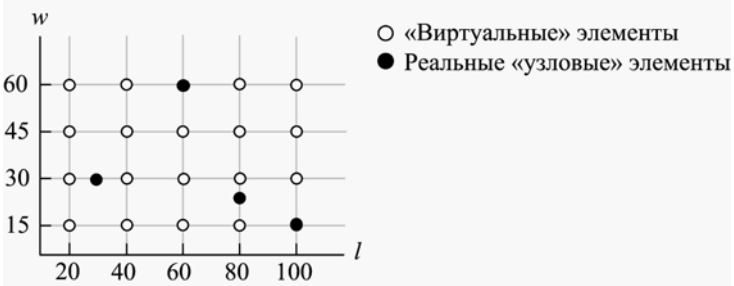


Рис. 3. Сетка конструктивных состояний тестовых элементов

На первом шаге для четырёх тестовых резисторов проведены измерения параметров рассеяния в диапазоне 0,1–40 ГГц и выполнено исключение паразитных параметров контактных площадок (деэмбеддинг) с использованием программного обеспечения [14].

На втором шаге для каждого из четырех тестовых резисторов по измеренным S-параметрам была построена ЭС-модель. Выбранная структура ЭС представлена на рис. 2, *б*. Значения элементов модели получены с использованием методик экстракции и программного обеспечения Extraction-P [15] (табл. 1).

Таблица 1

Значения элементов эквивалентной схемы, полученные из измерений *S*-параметров тестовых резисторов

Элемент	R, Ом	L, нГн	C_1, пФ	C_2, пФ
R15x100	352,9	0,07927	0,00794	0,00831
R20x80	210,6	0,05358	0,00740	0,00765
R30x30	53,41	0,03395	0,00409	0,00422
R60x60	52,47	0,04785	0,00692	0,00696

Определение поверхностного и контактного сопротивлений тонкопленочного резистора. Далее, на третьем шаге, проводился анализ физических уравнений, описывающих тонкопленочный резистор, с целью получения электрофизических параметров материалов для использования в ЭМ-моделировании.

В [1] приведено выражение для сопротивления тонкоплёночного резистора R_r:

$$R_r = R_S \frac{l}{w} + 2R_C \frac{1}{w}, \qquad (1)$$

где R_S – удельное поверхностное сопротивление резистивного материала (WSi); R_C – переходное сопротивление контакта резистивной и проводящей пленок на единицу ширины.

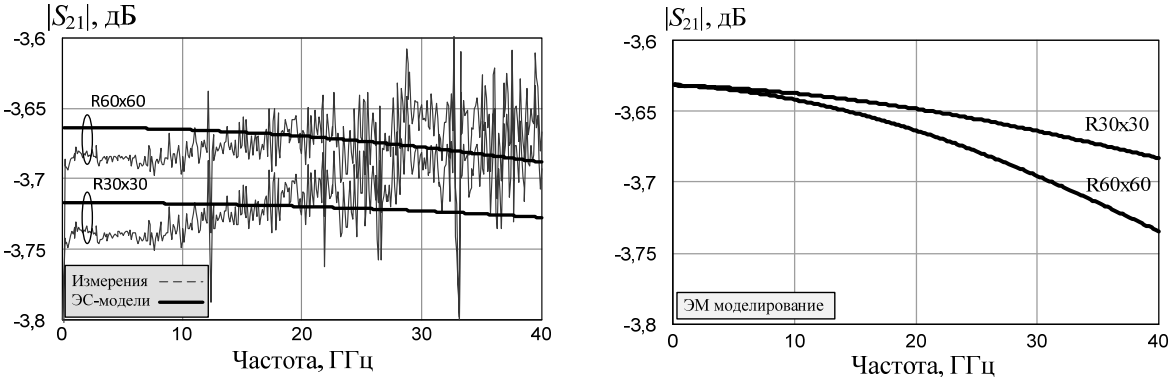
Строго говоря, выражение (1) справедливо для сопротивления постоянному току. Однако в данной работе мы принимаем допущение, что полученное значение R в построенной ЭС (рис. 2, *б*), описывающее потери в элементе, совпадает с сопротивлением постоянному току R_r. Подставляя в (1) значения R_r, l, w для четырех конструктивных состояний резистора из табл. 1, получаем систему из четырех уравнений относительно двух неизвестных R_S и R_C. Данная система уравнений является переопределённой. Применив для её решения метод наименьших квадратов, получим следующие значения электрофизических параметров: R_S = 51,9 Ом/кв.; $R_C = 2{,}7 \cdot 10^{-5}$ Ом·м.

ЭМ-моделирование тонкоплёночного резистора. ЭМ-моделирование выполнялось в пакете Sonnet Lite [16]. Программа предназначена для трехмерного планарного ЭМ-моделирования структур, состоящих из проводников и диэлектриков. Решение уравнений Максвелла в программе выполняется с помощью метода моментов. Граничные условия задаются в виде металлической стенки из идеального проводника, окружающей моделируемую структуру со всех сторон в форме параллелепипеда. Для проведения ЭМ-моделирования тонкопленочного резистора необходимо знать: относительную диэлектрическую проницаемость ε, тангенс угла диэлектрических потерь tgδ и толщину h_{sub} подложки, проводимость слоя металлизации золота σ, удельное поверхностное сопротивление резистивного материала R_S, контактное сопротивление R_C. Некоторые из необходимых параметров известны из данных технологического процесса: ε = 12,9; tgδ = 0,001; h_{sub} = 100 мкм; $\sigma = 4{,}07 \cdot 10^{-7}$ См/м. Величины R_S и R_C были найдены выше.

Сопротивление R_S является характеристикой резистивного материала и непосредственно вводится в качестве электрофизического параметра в программу ЭМ-моделирования. Однако учёт контактного сопротивления R_C при ЭМ-моделировании имеет определенные особенности. Численные эксперименты показали, что при использовании только проводящего и резистивного материала (т.е. без сопротивления R_C) рассчитанные в программе ЭМ-моделирования параметры рассеяния для резисторов R30×30 и R60×60 отличаются незначительно (особенно на частотах ниже 10 ГГц), однако это не совпадает с измеренными данными. На рис. 4 представлены результаты измерений, а также ЭМ-расчёта параметров рассеяния этих резисторов указанным способом (без дополнительных элементов контактного сопротивления). Можно сделать вывод, что в данной конфигурации ЭМ-моделирование не учитывает сопротивления переходной области на границе резистивного и проводящего слоев.

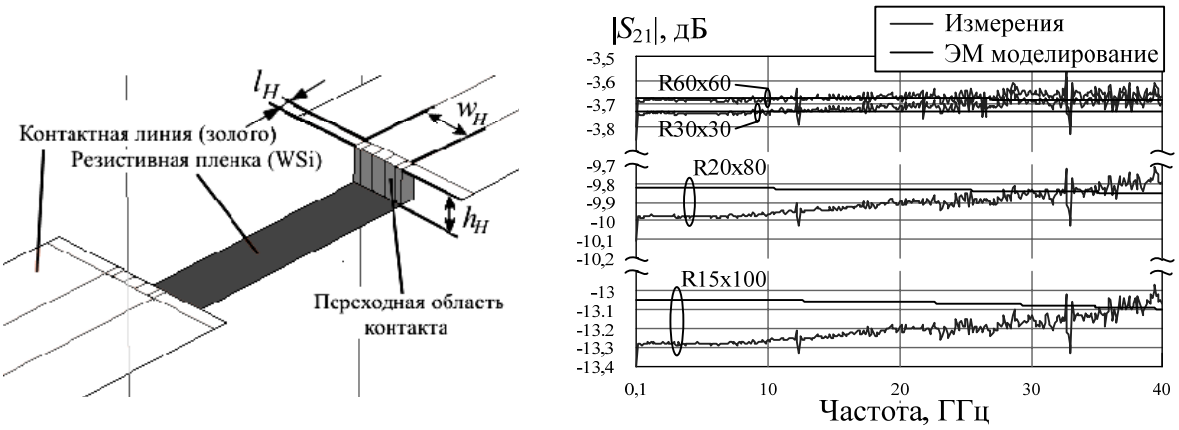
Дополнительные исследования показали, что для правильного учёта контактного сопротивления необходимо вводить дополнительный элемент в структуру резистора при ЭМ-моделировании. Для моделирования контактной области использовался элемент «сквозное прямоугольное отверстие» в диэлектрике (рис. 5, *а*). Геометрические размеры контакта, определяющие размеры переходного отверстия, следующие: длина $l_Н$ = 5 мкм (фиксирована), ширина $w_Н = w$ (равна ширине резистора). В качестве физической модели отверстия был выбран сплошной проводник, высота отверстия и проводимость материала подобраны для совпадения рассчитанных в программе ЭМ-моделирования и измеренных параметров рассеяния: $h_Н$ = 0,1 мкм; $\sigma = 2{,}5 \cdot 10^4$ См/м. На рис. 5 пред-

ставлена окончательная структура для ЭМ-моделирования, а также сравнение результатов расчета и измерения S-параметров для 4 тестовых резисторов.



а *б*

Рис. 4. Параметры рассеяния структур R30×30 и R60×60: *а* – результаты измерений и расчёта по ЭС; *б* – результаты расчёта упрощённой ЭМ-структуры (без дополнительных элементов контактного сопротивления)



а *б*

Рис. 5. Структура для ЭМ-моделирования резисторов (*а*) и сравнение результатов моделирования и эксперимента (*б*)

На четвертом шаге с использованием программы ЭМ-моделирования при найденных электрофизических параметрах материалов был выполнен расчёт *S*-параметров резисторов на сетке конструктивных состояний при варьировании *w* от 15 до 60 мкм с шагом 15 мкм и *l* от 20 до 100 мкм с шагом 20 мкм. Эти резисторы играют роль «виртуальных» тестовых элементов, их общее количество равно 20. Результирующая сетка «узловых» (реальных) и «виртуальных» тестовых элементов приведена на рис. 3.

Построение параметрической модели тонкопленочного резистора. На полученной сетке «виртуальных» элементов с использованием рассчитанных *S*-параметров и методики экстракции [15] были построены ЭС-модели резисторов (рис. 2, *б*). Эти резисторы имеют сопротивление от 18 до 350 Ом (оценено по значению элемента *R* эквивалентной схемы).

Методика построения параметрической ЭС-модели пассивного компонента описана в [12]. Она заключается в экстракции ЭС для каждого конструктивного состояния компонента и последующей аппроксимации значений элементов ЭС в пространстве конструктивных параметров. В данном случае значения элементов ЭС резистора *R*, *L*, *C* (рис. 2, *б*) являются функцией двух его конструктивных параметров *w* и *l*. Величины элементов *R*, *L*, *C* (рис. 2, *б*) аппроксимировались полиномами. С учётом теоретического описания сопротивления согласно выражению (1) для элемента *R* при аппроксимации в качестве переменных использовалась обратная ширина w^{-1} и длина *l*, т.е. применялась аппроксимирующая функция вида $R = f(w^{-1}, l)$. Также из соображений симметрии резистора в ЭС было принято $C_1=C_2=C$ (это подтверждается результатами экстракции моделей реальных резисторов – см. табл. 1).

Аппроксимация значений элементов ЭС проводилась в математическом пакете MatLab аналогично [14]. Полученные аппроксимирующие полиномы $R(w,l)$, $C(w,l)$ $L(w,l)$ имеют следующий вид:

$$R = 0{,}46 + 45w^{-1} - 0{,}011l + 52lw^{-1} + 2{,}1\cdot 10^{-5}; \quad (2)$$

$$L = -0{,}016 + 0{,}001w + 2{,}2\cdot 10^{-5}l - 8{,}8\cdot 10^{-6}w^2 - 4{,}1\cdot 10^{-6}lw + 6{,}7l^2; \quad (3)$$

$$C = 5{,}7\cdot 10^{-4} - 1{,}5\cdot 10^{-5}w + 5{,}6\cdot 10^{-5}l + 7\cdot 10^{-8}w^2 + 6{,}3\cdot 10^{-7}wl - 4\cdot 10^{-8}l^2. \quad (4)$$

На рис. 6 показаны поверхности аппроксимирующих функций в пространстве конструктивных состояний (w, l). Точками на рисунке показаны исходные данные для интерполяции – значения элементов ЭС в узлах сетки конструктивных состояний.

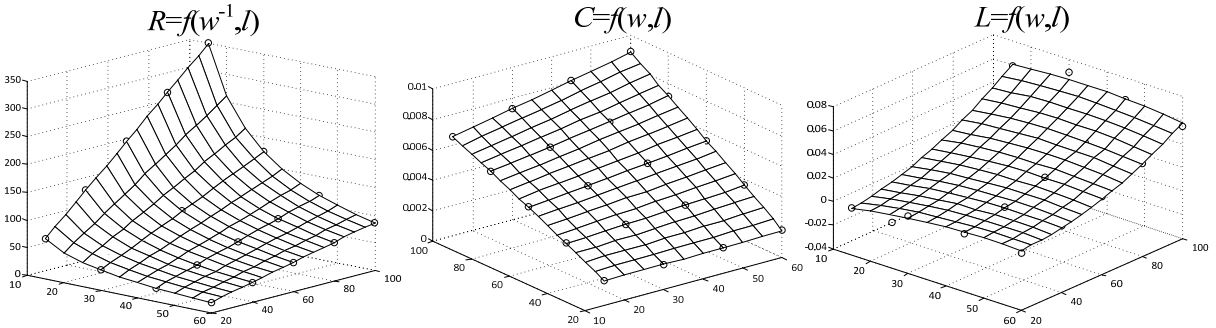


Рис. 6. Поверхности значений элементов ЭС в пространстве (w, l)

В табл. 2 приведено сравнение значений элементов ЭС, полученных при экстракции из измеренных S-параметров 4 «узловых» тестовых резисторов и рассчитанных по выражениям (2)–(4) для тех же значений w и l. Приведенные данные свидетельствуют о достаточно точной аппроксимации элементов ЭС.

Таблица 2

Значения элементов ЭС резистора, рассчитанные по измеренным *S*-параметрам и по параметрической модели

Элемент	R, Ом		L, нГн		C_1, пФ	C_2, пФ	C_1=C_2, пФ
	Изм.	Апп.	Изм.	Апп.	Изм.	Изм.	Апп.
R15×100	352,9	349,2	0,07927	0,06024	0,00794	0,00831	0,00654
R20×80	210,6	210,0	0,05358	0,03881	0,00740	0,00765	0,00555
R30×30	53,41	53,67	0,03395	0,00948	0,00409	0,00422	0,00240
R60×60	52,47	52,63	0,04785	0,02376	0,00692	0,00696	0,00541

Найденные зависимости (2)–(4) использовались для построения масштабируемой модели тонкопленочного WSi резистора в виде ЭС для GaAs pHEMT-технологии изготовления МИС. Модель была реализована в САПР Microwave Office.

С целью верификации масштабируемой модели для «узловых» тестовых элементов была рассчитана относительная среднеквадратичная ошибка (СКО) по всем S-параметрам и всем частотным точкам:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n}\varepsilon_k}{4n}};$$

$$\varepsilon_k = \delta S_{11}(f_k)^2 + \delta S_{12}(f_k)^2 + \delta S_{21}(f_k)^2 + \delta S_{22}(f_k)^2; \quad (5)$$

$$\delta S_{ij}(f_k) = \frac{\left|S_{ij\mathrm{MEA}S}(f_k) - S_{ij\mathrm{MODEL}}(f_k)\right|}{\left|S_{ij\mathrm{MEAS}}(f_k)\right|};\ i, j = 1, 2, \quad (6)$$

где $f_k\,(k=\overline{1,n})$ – частоты измерений; n – число частотных точек; $S_{ij\mathrm{MEAS}}$ – значение параметра S_{ij}, полученное при измерениях на частоте f_k; $S_{ij\mathrm{MODEL}}$ – значение параметра S_{ij}, полученное при моделировании на частоте f_k.

Результаты вычисления в диапазоне частот 0,1–40 ГГц СКО, максимальной относительной ошибки по модулю $\max\delta|S_{ij}|$ и максимальной абсолютной ошибки по фазе $\max\Delta\varphi(S_{ij})$ для ЭС-моделей, рассчитанных из измеренных *S*-параметров, а также для параметрической модели в «узловых» конструктивных состояниях, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Погрешности построенных моделей тонкопленочного резистора

Элемент	Тип модели	СКО, %	$\max\delta\|S_{ij}\|$, %	$\max\Delta\varphi(S_{ij})$, °
R15×100	ЭС-модель	1,71	4,16	3,33
R20×80	ЭС-модель	1,24	3,27	3,05
R30×30	ЭС-модель	1,28	5,03	3,13
R60×60	ЭС-модель	1,71	5,01	3,99
R15×100	Парам. модель	3,33	3,55	5,21
R20×80	Парам. модель	3,42	3,05	4,83
R30×30	Парам. модель	3,05	4,98	4,20
R60×60	Парам. модель	3,18	5,17	4,34

В качестве примера на рис. 7 представлены частотные зависимости измеренных и рассчитанных по масштабируемой модели модулей и фаз *S*-параметров для тонкопленочного резистора 30×30.

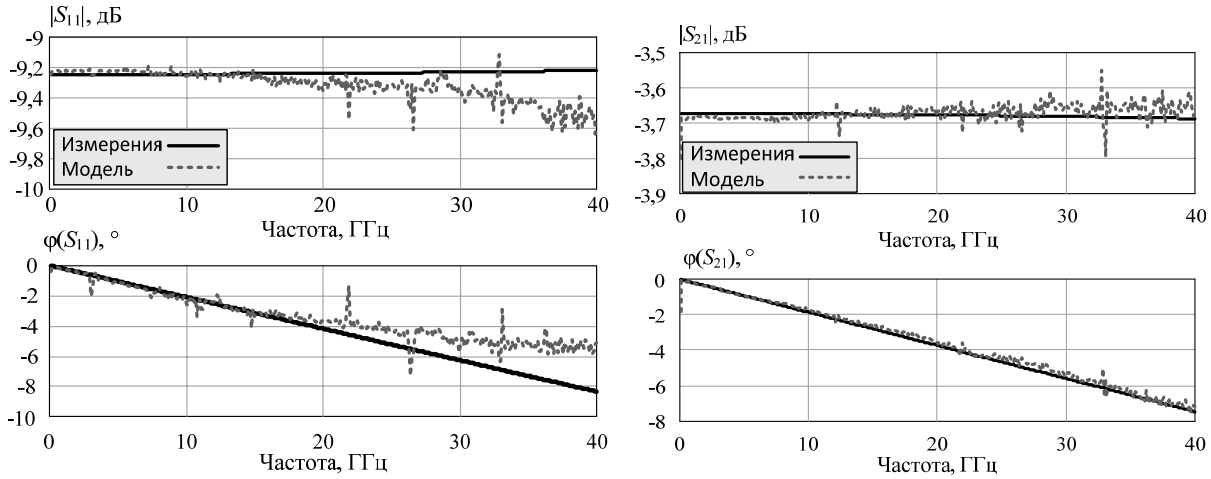


Рис. 7. Сравнение *S*-параметров резистора 30×30, полученных в результате измерения и рассчитанных по масштабируемой модели

Из данных табл. 2 и 3 можно сделать вывод, что точность построенной параметрической модели тонкопленочного резистора вполне достаточна для использования в САПР. СКО для измеренных тестовых элементов не превышает 3,5%.

Заключение. В работе представлена общая методика построения параметрических моделей пассивных элементов СВЧ МИС. Принципиальной особенностью предлагаемой методики является то, что данные (электрофизические параметры) для ЭМ-анализа «виртуальных» элементов на частой сетке определяются из результатов измерений *S*-параметров небольшого числа тестовых элементов и анализа физических уравнений. Благодаря этому уменьшается требуемое на полупроводниковой пластине место для тестовых элементов, снижаются затраты на их проектирование и изготовление. Для демонстрации методики подробно рассмотрен процесс построения параметрической модели тонкопленочного резистора на основе WSi. В процессе построения модели использовались результаты измерений 4 «узловых» тестовых резисторов, изготовленных на GaAs-подложке. Показана достаточная для практики точность масштабируемой модели в диапазоне частот до 40 ГГц.

Литература

1. Bahl I.J. Lumped elements for RF and microwave circuit. – London-Boston: Artech House, 2003. –492 p.

2. Lin S. Scalable lumped model with multiple physical parameters for embedded passives / S. Lin, L. Yang, H. Chang // Electronic Components and Technology Conference, Proceedings. – 2005. – Vol. 2. – P. 1842–1845.

3. Brinkhoff J. Scalable Transmission Line and Inductor Models for CMOS Millimeter-Wave Design / J. Brinkhoff, K. Kok, K. Kai, F. Lin // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2008. – Vol. 56, №12. – P. 2954–2962.

4. Triverio P. Extraction of parametric circuit models from scattering parameters of passive RF components / P. Triverio, M. Nakhla, S. Grivet-Talocia // Microwave Integrated Circuits Conference. – 2010. – P. 393–396.

5. Angiulli G. Microwave Devices and Antennas Modelling by Support Vector Regression Machines / G.. Angiulli, M. Cacciola, M. Versaci // IEEE Transactions on Magnetics – 2007. – Vol. 43, №4. – P. 1589–1592.

6. Liu L. A New Equivalent Circuit Model of MIM Capacitor for RFIC / L. Liu, J. Wang, L. Feng-Chang // International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. – 2007. – Vol. 1, №3. – P. 18–21.

7. Gao W. Scalable compact circuit model and synthesis for RF CMOS spiral inductors / W. Gao, Z. Yu // Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on. – 2006. – Vol. 54, №. 3. – P. 1055–1064.

8. Yao J. Scalable Compact Modeling for On-Chip Passive Elements with Correlated Parameter Extraction and Adaptive Boundary Compression / J. Yao, Z. Ye, Y. Wang // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems – 2014. – Vol. 33, № 9. – P. 1424–1428.

9. Engels M. Rigorous 3D EM simulation and an efficient approximate model of MMIC overlay capacitors with multiple feedpoints / M. Engels, R.H. Jansen // IEEE Microwave Symposium Digest. – IEEE, 1993. – P. 757–760.

10. Scalable transmission line and inductor models for CMOS millimeter-wave design / Brinkhoff J. et al. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques – 2008. – Vol. 56. – №. 12. – P. 2954–2962.

11. Coplanar passive elements on Si substrate for frequencies up to 110 GHz / Heinrich W. et al. // Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on. – 1998. – Vol. 46, № 5. – P. 709–712.

12. Горяинов А.Е. Построение параметрических моделей пассивных компонентов СВЧ-монолитных интегральных схем с использованием программы Extraction-P / А.Е. Горяинов, И.М. Добуш, Л.И. Бабак // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2 (26), ч. 2. – С. 98–103.

13. Спирин В.Г. Сопротивление контактов тонкопленочного резистора // Электронные средства: исследования, разработки. – 2008. – №5. – С. 20–23.

14. Добуш И.М. Программное обеспечение для автоматизации измерений, деэмбеддинга и построения линейных моделей СВЧ-полевых транзисторов / И.М. Добуш и др. // Доклады ТУСУРа. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2011. – Ч. 2 (24). – С. 99–105.

15. Горяинов А.Е. Программа для экстракции параметров эквивалентных схем пассивных компонентов СВЧ-монолитных интегральных схем / А. Е. Горяинов, А.В. Степачева, И.М. Добуш, Л.И. Бабак // 22-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2012): матер. конф.: в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2012. – Т. 1. – С. 129–130.

16. Официальный сайт компании Sonnet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.sonnetsoftware.com, свободный (дата обращения: 23.09.14).

Сальников Андрей Сергеевич
Мл. науч. сотр. лаб. интеллектуальных компьютерных систем (ЛИКС) ТУСУРа
Тел.: 8 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: ansalnikov@gmail.com

Добуш Игорь Мирославович
Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ЛИКС
Тел. (раб.): +7-913-827-52-91
Эл. почта: igadobush@gmail.com

Горяинов Александр Евгеньевич
Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа
Тел. (раб.): +7-913-827-52-91
Эл. почта: goryainov.alex@gmail.com

Бабак Леонид Иванович
Д-р техн. наук, профессор каф. КСУП, зам. директора НОЦ «Нанотехнология»
Тел.: 8 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: leonid.babak@rambler.ru

Salnikov A.S., Dobush I.M., Goryainov A.E., Babak L.I.
Scalable model building of a monolithic thin-film resistor based on RF measurement and electromagnetic simulation

A new technique for building of scalable models of passive MMIC elements is presented. It allows to decrease a number of required test structures. The principal technique feature is that it uses measured S-parameters of real test elements as well as «virtual» S-parameters of elements calculated from EM simulation. In addition, electrophysical parameters of materials necessary for EM simulation are obtained using the extraction of simple equivalent circuits of measured elements and analysis of physical equations. The technique is applied to constructing a scalable model of a thin-film GaAs MMIC resistor.
Keywords: GaAs, MMIC, monolithic thin-film resistor, scalable model, EM simulation.