

УДК 621.382, 681.5.08

А.С. Сальников, И.М. Добуш, Л.И. Бабак, Н.А. Торхов

Экспериментальное исследование и построение моделей пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем с учетом технологического разброса параметров

В диапазоне частот до 40 ГГц представлены результаты измерений S -параметров и экстракции эквивалентных схем пассивных сосредоточенных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем в копланарном исполнении – тонкопленочного резистора, МДМ-конденсатора и квадратной спиральной катушки индуктивности. Компоненты изготовлены по отечественной монолитной 0,3 мкм GaN НЕМТ-технологии на подложке из сапфира. Предложена и исследована также методика построения статистических моделей пассивных СВЧ-компонентов, учитывающих технологический разброс параметров.

Ключевые слова: СВЧ монолитная интегральная схема, модели компонентов, эквивалентная схема, статистический анализ.

При проектировании СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) широкое применение нашли модели активных и пассивных компонентов в виде эквивалентных схем (ЭС). Они обладают такими преимуществами, как простота, высокое быстродействие, возможность экстраполяции характеристик, связь с физической структурой СВЧ-компонента.

При построении ЭС-модели выбор ее структуры остается за разработчиком модели. Для расчета параметров элементов есть несколько способов: аналитический расчет на основе знания физических процессов [1], прямая экстракция, т.е. расчет элементов по результатам измерений или электромагнитного моделирования [1–4], использование оптимизационных методов для минимизации расхождения характеристик модели и данных измерения [1, 5, 6]. В [7] были предложены усовершенствованные аналитическая и комбинированная методики экстракции элементов ЭС пассивных СВЧ-компонентов, на этой основе разработано специальное программное обеспечение. Преимущества указанных методик описаны в [7].

В настоящей работе представлены результаты измерений S -параметров и построения с использованием методик [7] ЭС-моделей пассивных сосредоточенных компонентов СВЧ МИС в копланарном тракте. Пассивные компоненты изготовлены по 0,3 мкм GaN НЕМТ-технологии на сапфировой подложке, разработанной в ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (НИИПП, г. Томск). Одной из целей работы является исследование эффективности разработанных методик экстракции и программного обеспечения в реальных задачах.

Кроме того, на основе измерений и методик экстракции [7] предложена и исследована методика построения моделей пассивных СВЧ-компонентов, учитывающих технологический разброс параметров. При использовании статистических методов моделирования СВЧ МИС, реализованных в современных САПР, такие модели позволяют оценить и оптимизировать процент выхода годных изделий еще на этапе проектирования. Следует отметить, что рассматриваемый здесь общий подход для построения статистических моделей СВЧ-компонентов известен [8]. Особенностью предлагаемой процедуры является использование оригинальных методик экстракции и соответствующего программного обеспечения.

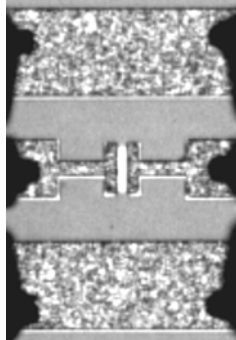
Разработанные модели пассивных компонентов предполагается использовать в программах моделирования и автоматизированного синтеза СВЧ-устройств [9] при проектировании МИС мм-диапазона волн на основе отечественной монолитной технологии.

1. Измерения параметров и построение моделей пассивных компонентов СВЧ МИС. Приведем вначале результаты измерений S -параметров и построения моделей пассивных копланарных компонентов СВЧ МИС без учета технологического разброса. Ниже представлены примеры экстракции ЭС тонкопленочного резистора с сопротивлением 16 Ом, МДМ-конденсатора емкостью около 0,5 пФ и квадратной спиральной катушки индуктивности величиной 0,45 нГн.

Исходные данные (S -параметры) в диапазоне частот 0,1–40 ГГц для построения моделей компонентов получены при помощи зондовых измерений на полупроводниковой пластине в научно-

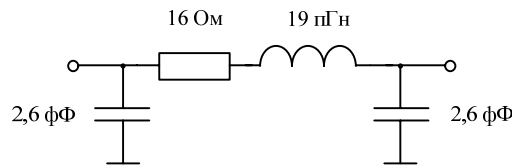
образовательном центре «Нанотехнологии» (ТУСУР, г. Томск). Исключение паразитных влияний контактных площадок и подводящих линий из результатов измерений параметров рассеяния СВЧ-компонентов проводилось с использованием метода «L-2L» в программе Deembedding [10]. Определение значений элементов ЭС выполнялось с использованием программы экстракции Extraction-P на основе разработанных авторами методик [7].

Экстракция элементов ЭС тонкопленочного резистора. На рис. 1, а приведена фотография копланарного тонкопленочного резистора на основе силицида вольфрама с размерами 50×10 мкм. Для представления резистора выбрана ЭС, изображенная на рис. 1, б. Найденные после экстракции ЭС значения элементов показаны на рис. 1.



а

На рис. 2 представлено сравнение в диапазоне 0,1–40 ГГц частотных зависимостей параметров рассеяния копланарного резистора, полученных при измерениях, с рассчитанными по ЭС.



б

Рис. 1. Тонкопленочный резистор (а) и его схема замещения (б)

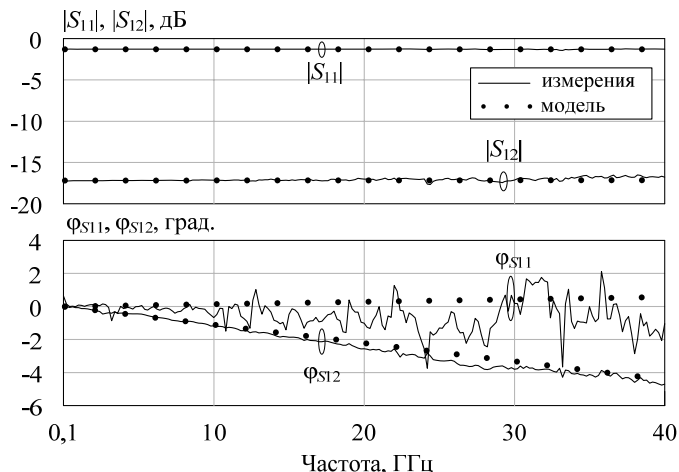


Рис. 2. Частотные зависимости параметров рассеяния тонкопленочного резистора и его ЭС-модели

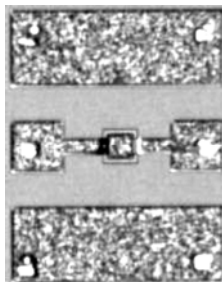
Из графиков видно, что измеренные и рассчитанные по модели параметры рассеяния копланарного резистора хорошо совпадают. В диапазоне частот до 40 ГГц максимальная ошибка параметров рассеяния не превышает 2% по модулю и 4° по фазе.

Экстракция элементов ЭС МДМ-конденсатора. Построим модель копланарного МДМ-конденсатора с геометрическими размерами 30×30 мкм (рис. 3, а). Для представления такого конденсатора использована ЭС, показанная на рис. 3, б.

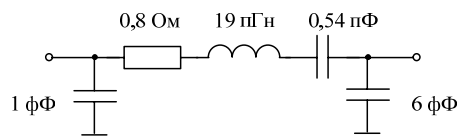
Полученные с помощью программы Extraction-P величины элементов ЭС представлены на рис. 3, б.

На рис. 4 приведены измеренные и рассчитанные по ЭС частотные зависимости параметров рассеяния МДМ-конденсатора.

Как видно, отличие измеренных и рассчитанных по модели параметров рассеяния копланарного конденсатора достаточно мало. В диапазоне частот до 40 ГГц максимальная ошибка по модулю параметров рассеяния не превышает 4% и по фазе 4° .



а



б

Рис. 3. Копланарный межслойный конденсатор (а) и его ЭС (б)

Экстракция элементов ЭС спиральной катушки индуктивности. Геометрические размеры спиральной катушки индуктивности (рис. 5, а) следующие: ширина проводника – 15 мкм, длина спирали – 850 мкм, зазор – 10 мкм. Для представления спиральной катушки индуктивности выберем ЭС, изображенную на рис. 5, б. Параметры рассеяния катушки, полученные в результате измерений, приведены на рис. 6. Найденные значения элементов ЭС представлены на рис. 5, б.

Сравнение измеренных и рассчитанных по модели параметров рассеяния копланарной катушки индуктивности (см. рис. 6) показывает, что они хорошо совпадают в диапазоне до 40 ГГц. Ошибка параметров рассеяния не превышает 3% по модулю и 6° по фазе.

2. Методика построения моделей пассивных компонентов СВЧ МИС с учетом технологического разброса. Таким образом, предложенные в [7] методики экстракции обеспечивают хорошую точность определения ЭС пассивных компонентов СВЧ МИС. Однако полученные модели не учитывают технологический разброс параметров компонентов. В связи с этим с их помощью нельзя предсказать величину разброса характеристик МИС при серийном выпуске, выход годных изделий, оценить качество технологического процесса и т.д.

Отметим, что способ учета при моделировании СВЧ-устройств технологического разброса параметров компонентов путем построения их статистических моделей в виде ЭС известен из литературы [8].

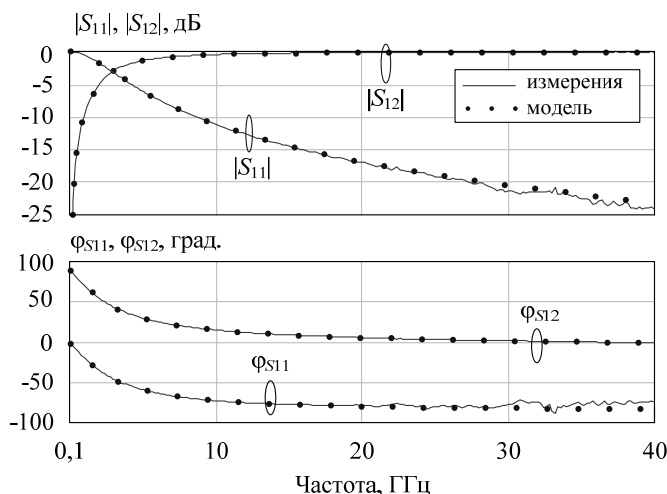
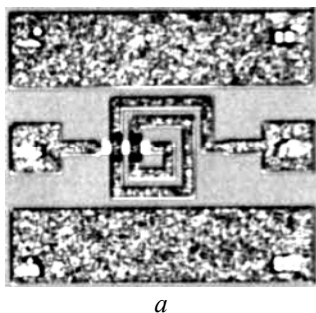


Рис. 4. Частотные зависимости параметров рассеяния копланарного МДМ-конденсатора и его ЭС-модели

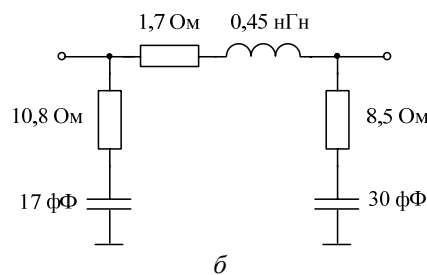


Рис. 5. Копланарная катушка индуктивности (а) и её ЭС (б)

Однако его практическая эффективность и достоверность во многом зависят от процедуры построения статистических моделей компонентов для применяемой технологии изготовления СВЧ-устройства.

Нами предлагается следующая методика построения моделей пассивных компонентов СВЧ МИС, позволяющая учесть технологический разброс параметров:

1. Размещение нескольких экземпляров пассивного компонента в различных областях пластины.
2. Измерение S-параметров компонентов.
3. Выбор структуры ЭС.
4. Экстракция параметров ЭС для нескольких экземпляров одного компонента на пластине.
5. Вычисление статистических параметров для каждого элемента ЭС компонента: математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение.

Следует указать, что на 4-м этапе теоретически могут быть применены любые известные способы экстракции параметров ЭС СВЧ-компонентов [1–6]. Однако для успешного осуществления предложенной методики на практике процедура экстракции модели должна удовлетворять следующим условиям: точность определения элементов ЭС, быстрота, малая трудоемкость, возможность автоматизации. Всеми этими качествами обладают методики экстракции, описанные в [7] и реализованные в программе Extraction-P. Поэтому они обеспечивают основу для построения статистических моделей.

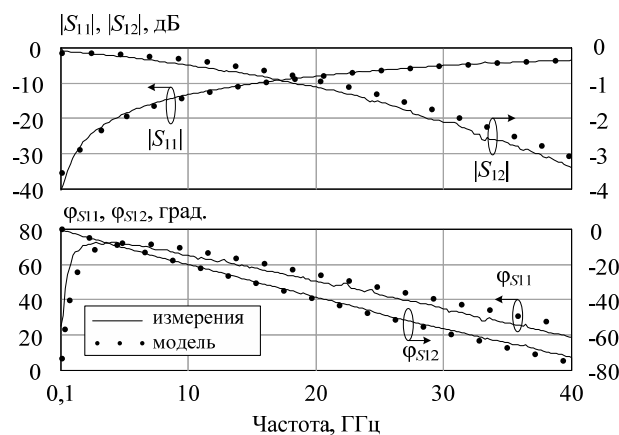


Рис. 6. Частотные зависимости параметров рассеяния спиральной катушки индуктивности и её ЭС-модели

Полученные статистические модели пассивных СВЧ-компонентов могут быть использованы двумя способами:

1) Они могут быть непосредственно интегрированы в коммерческие САПР СВЧ-устройств (например, Microwave Office, ADS и др.) для расчета статистических характеристик СВЧ МИС.

2) Для каждого типа компонента в такой САПР может быть выполнено моделирование полученной ЭС с использованием метода Монте-Карло для определения диапазона вариации параметров компонента как четырехполюсника (например, S -параметров). Далее подобные поведенческие модели пассивных компонентов могут быть интегрированы в САПР, обеспечивая более высокую скорость расчета статистических характеристик СВЧ МИС.

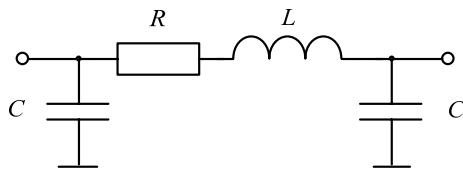


Рис. 7. Схема замещения тонкопленочного резистора

Проверка предложенной методики была выполнена на примере построения статистической модели тонкопленочного резистора на основе силицида вольфрама. С этой целью проведено измерение 8 экземпляров тестовых резисторов одинакового размера (см. рис. 1, а), расположенных в разных областях пластины, и с использованием программы Extraction-P для каждого из них получены параметры ЭС. Структура ЭС представлена на рис. 7, а найденные усредненные значения и среднеквадратичные отклонения элементов приведены в таблице.

Параметры модели тонкопленочного резистора, учитывающей технологический разброс

| Элемент ЭС | R , Ом | L , пГн | C , фФ |
|-------------------------------|----------|-----------|----------|
| Математическое ожидание | 15,7 | 18,0 | 2,4 |
| Среднеквадратичное отклонение | 0,9 | 2,0 | 0,6 |

Далее с помощью полученной статистической модели был определен диапазон изменения модулей и фаз параметров рассеяния резистора из-за технологического разброса. На основе среднего значения и среднеквадратичного отклонения для выбранной ЭС (см. рис. 7) с использованием САПР Microwave Office было проведено 500 опытов статистического моделирования методом Монте-Карло. На рис. 8 и 9 представлены результаты численного эксперимента. На графиках также показаны исходные результаты измерений для 8 экземпляров тестовых резисторов.

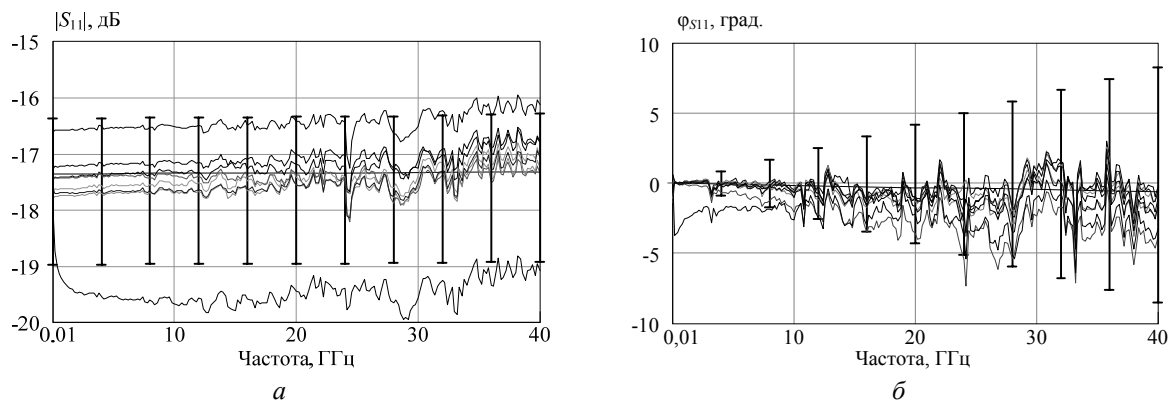


Рис. 8. Измеренные частотные зависимости параметра рассеяния S_{11} 8 экземпляров копланарного тонкопленочного резистора и рассчитанный разброс параметров

Результаты эксперимента показывают, что построенная статистическая модель с удовлетворительной точностью описывает диапазоны изменения модулей и фаз S -параметров однотипных тонкопленочных резисторов на пластине. Следует отметить, что параметры одного из 8 резисторов существенно отличаются от параметров остальных, для него величина $|S_{11}|$ не попадает в полученный интервал (рис. 8, а). Можно сделать предположение, что указанное обстоятельство связано с неоднородностью материалов на соответствующем участке пластины или с качеством технологического процесса. Для повышения точности статистической модели при ее построении измеренные параметры этого резистора, очевидно, должны быть опущены. В будущем планируется более подробное исследование статических параметров распределения и сравнения результатов статистического моделирования.

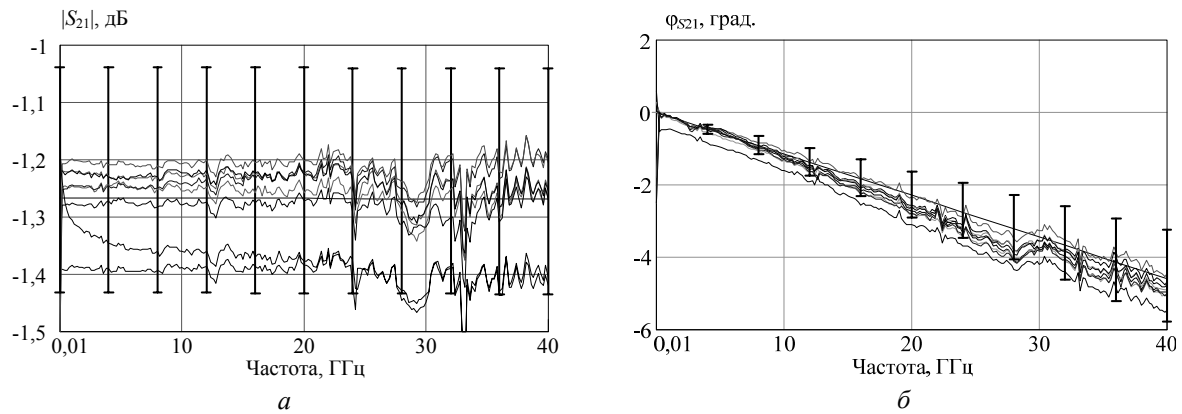


Рис. 9. Измеренные частотные зависимости параметра рассеяния S_{21} 8 экземпляров копланарного тонкоплёночного резистора и рассчитанный разброс параметров

В целом результаты численного эксперимента показывают возможность использования предложенной методики для построения моделей пассивных компонентов СВЧ МИС, учитывающих технологический разброс.

Заключение. Применение разработанных авторами методик экстракции и программы Extraction-P на их основе [7] позволило построить модели пассивных компонентов СВЧ МИС, изготовленных по 0,3 мкм GaN НЕМТ-технологии на сапфировой подложке. Исследование показало, что методики экстракции ЭС достаточно эффективны и обеспечивают хорошую точность моделей. Также была предложена методика построения моделей пассивных компонентов МИС, учитывающая технологический разброс параметров, и показана её работоспособность.

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, 14.В37.21.0345), «Микроэлектроника» (П669, 16.740.11.0092, 14.740.11.1136, 14.В37.21.0462) и «Проведение исследований коллективами НОЦ по направлению «Микроэлектроника» (14.740.11.0135).

Литература

1. Bahl I.J. Lumped elements for RF and microwave circuits // Artech House. – Boston: London, 2003. – P. 488.
2. Dambrine G. A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1988. – Vol. 36, №7. – P. 1151–1159.
3. Емцев П.А. Моделирование транзисторов с высокой подвижностью электронов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2003. – № 6. – С. 20–26.
4. Coplanar MMICs – The future for mass production! / T. Sporkmann, M. Nached, L. Verweyen, W.H. Haydl, M. Schlechtweg // Gallium Arsenide Applications Symposium. GAAS 1998. – Amsterdam, 1998. – P. 236–251.
5. Jarndal A. New Small-Signal Modeling Approach Applied to GaN Devices / A. Jarndal, G.A. Kompa // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2005. – Vol. 53, №11. – P. 3440–3448.
6. Gil J. A simple wide-band on-chip inductor model for silicon-based RF ICs / J. Gil, H. Shin // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2003. – Vol. 51, № 9. – P. 2023–2028.
7. Добуш И.М. Программа экстракции эквивалентных схем пассивных СВЧ-компонентов в среде символьных вычислений / И.М. Добуш, М.В. Черкашин, Л.И. Бабак // Матер. докл. VII Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления» (10–11 ноября 2011 г.). – Томск: В-Спектр, 2011. – С. 161–168.
8. Bandler J.W. Integrated Physics-Oriented Statistical Modeling, Simulation and Optimization / J.W. Bandler, R.M. Biernacki, Q. Cai // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. – 1992. – Vol. 40, №7. – P. 1347–1400.
9. Структурный синтез СВЧ транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма с использованием параметрических моделей монолитных элементов / А.А. Калентьев, Д.В. Га-райс, Л.И. Бабак и др. // 22-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные техноло-

гии» (КрыМиКо'2012). Севастополь, 10–14 сентября 2012 г.: матер. конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2012. – Т. 1. – С. 131–132.

10. Программное обеспечение для автоматизации измерений, деэμβеддинга и построения линейных моделей СВЧ полевых транзисторов / И.М. Добуш, А.В. Степачева, А.А. Кокотов и др. // Доклады ТУСУРа. – Томск, 2011. – №2 (24), ч. 2. – С. 99–105.

Сальников Андрей Сергеевич

Аспирант каф. КСУП, ассистент каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: 8 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: ansalnikov@gmail.com

Добуш Игорь Мирославович

Мл. науч. сотрудник лаборатории интеллектуальных компьютерных систем ТУСУРа
Тел.: 8 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: igadobush@gmail.com

Бабак Леонид Иванович

Канд. техн. наук, зам. директора НОЦ «Нанотехнологии»,
доцент каф. компьютерных систем в управлении и проектировании
Тел.: 8 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: leonid.babak@rambler.ru

Торхов Николай Анатольевич

Канд. физ-мат. наук, начальник технологической лаборатории отдела 4
ОАО «НИИПП», докторант ТУСУРа
Тел.: 8 (382-2) 55-66-95
Эл. почта: trkf@mail.ru

Salnikov A.S., Dobush I.M., Babak L.I., Torkhov N.A.

Experimental investigation and modeling of MMIC passive components by taking technological spread of parameters into account

There are presented the measured *S*-parameters of passive lumped MMIC components in coplanar implementation (particularly, a thin-film resistor, MDM capacitor and square spiral inductor) in the frequency range up to 40 GHz. Components were manufactured by domestic monolithic 0.3 μm GaN HEMT-technology on a sapphire substrate. Also, the extraction of equivalent circuits of passive MMIC components with using new analytical and combined techniques and software is demonstrated. On this basis, there is proposed and investigated a technique for constructing statistical models of passive microwave components by taking technological spread of parameters into account.

Keywords: MMIC, component model, equivalent circuit, statistical analysis.