

# Методика моделирования QFN корпусов и ее верификация

В.И. Степанов, А.А. Метель, А.С. Сальников, И.М. Добуш, А.А. Калентьев

Лаборатория автоматизации разработки микроэлектронных устройств «50ohm Lab»,  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск,  
vladislav.stepanov@50ohm.tech

**Аннотация** — В настоящей статье рассмотрены методы учета паразитных эффектов корпуса и разварочных проволочек. Представлена методика моделирования QFN корпусов, которая может быть использована при построении табличных моделей корпусов различных размеров. Методика основана на использовании результатов трехмерного электромагнитного моделирования. Методика моделирования используется при построении табличной модели отечественного QFN корпуса, размерами  $3 \times 3 \text{ мм}^2$ . Для верификации разработанной методики используются измерения СВЧ МИС диапазона частот 2–7 ГГц до корпусирования и после. Приведено сравнение результатов моделирования и измерений СВЧ МИС в корпусе.

**Ключевые слова** — Керамические корпуса, QFN, СВЧ МИС, электромагнитное моделирование, эквивалентные схемы, методика моделирования, верификация.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка СВЧ монолитных интегральных схем (СВЧ МИС), как правило, носит многоитерационный характер и завершается технологическими операциями разварки и корпусирования. В корпусе может располагаться одна или несколько СВЧ МИС [1]. Его использование необходимо для того, чтобы защитить СВЧ МИС от внешних дестабилизирующих воздействий, таких как электромагнитное излучение, загрязнения или радиация. Также корпуса не должны существенно ухудшать основные параметры устройств, должны иметь малые габариты и низкую стоимость.

В качестве наиболее распространенных семейств корпусов стоит выделить: плоский корпус с четырёхсторонним расположением выводов (от англ. QFP – Quad Flat Package); корпуса с размерами кристалла (от англ. CSP – Chip-scale Package); малогабаритные корпуса (от англ. SOP – Small-Outline Package) [2]–[5]. Наиболее часто при изучении корпусируемых СВЧ МИС, можно встретить QFN (от англ. QFN – Quad Flat No-leads package) корпуса из семейства CSP благодаря малым габаритам, а также удобному расположению контактов на нижней стороне корпуса, что обеспечивает хорошее электрическое соединение при последующем монтаже и сравнительно малое влияние на параметры СВЧ МИС.

Сложностью при разработке корпусируемых СВЧ МИС является учет паразитных эффектов корпуса и разварочных проволочек. Расширение диапазона

частот и ужесточение требований к СВЧ МИС вынуждает в некоторых ситуациях вовсе отказываться от корпусов в пользу лучших характеристик устройства на кристалле [6]. Ведущие отечественные и зарубежные компании могут предоставлять свою продукцию в корпусе или же в виде отдельных кристаллов [7]–[12].

В качестве наиболее распространенных подходов, для оценки влияния корпуса на параметры СВЧ МИС, стоит выделить: оценочное моделирование на основе опыта инженера-проектировщика и использование модели корпуса.

При оценочном моделировании корпуса используются модели проволочек [13]–[15] и имитируются емкостные связи по входу и выходу СВЧ МИС. Оно активно применяется на практике за счет простоты методики, однако оценочное моделирование не позволяет прогнозировать возможность реализации заданных требований, с использованием определенных интегральной технологии и корпуса, что является неотъемлемой частью первоначального этапа проектирования.

Прогнозировать вносимое корпусом изменение параметров СВЧ МИС можно при помощи моделей. Модели корпусов могут быть построены на основе результатов измерений или при помощи трехмерного электромагнитного моделирования. Первый способ является наиболее точным, однако необходимость разварки в корпусе тестовых структур и проведение дополнительных измерений является трудозатратным. Второй способ является наиболее быстрым и обладает достаточной точностью, однако необходимо использовать специальные САПР для электромагнитного моделирования и их настройка. В качестве наиболее распространенных стоит выделить: Ansys HFSS, CST Studio Suite, Keysight PathWave Advanced Design System и EM Design, Cadence AWR Analyst.

Модели корпусов могут быть построены следующим образом: производитель корпуса самостоятельно строит модель и предоставляет разработчикам СВЧ МИС или сторонняя компания занимается построением моделей и предоставляет их разработчикам. В качестве примера можно привести Modelithics Inc. Компания специализируется на построении моделей, в том числе QFN корпусов, размером от  $3 \times 3 \text{ мм}^2$  до  $8 \times 8 \text{ мм}^2$ , которые могут

использоваться в специализированных САПР, предназначенных для разработки СВЧ монолитных интегральных схем [16].

Необходимо отметить, что возможность использования модели корпуса при проектировании СВЧ МИС позволяет существенно повысить эффективность разработки как отдельных устройств, так и целых систем [17]–[20]. Становится возможным уменьшение количества итераций изготовления, благодаря учету влияния корпуса на конечные параметры устройства, что также приводит к уменьшению конечной стоимости СВЧ МИС. Целью настоящей работы является разработка методики моделирования QFN корпуса, размерами  $3 \times 3 \text{ мм}^2$ .

В разделе 2 настоящей статьи будут рассмотрены компактные модели корпусов: приведены используемые методы учета влияния корпуса, основанные на компактных моделях, рассмотрены методы экстракции параметров элементов эквивалентных схем и способы масштабирования моделей. В разделе 3 будет рассмотрено моделирование корпуса: описана методика моделирования корпуса, включая построение макета корпуса и настройку электромагнитного моделирования в САПР. А в разделе 4 приведена верификация методики моделирования корпуса, основанная на сравнении результатов моделирования и измерений СВЧ МИС в корпусе.

## II. КОМПАКТНЫЕ МОДЕЛИ КОРПУСА

Одним из методов для учета влияния корпуса является построение компактной модели, представляющей собой эквивалентную схему (ЭС), описывающую разварочные проволочки, отдельные части корпуса или корпус целиком. Структура ЭС определяется физическими эффектами, возникающими в корпусе, и может быть построена на основе результатов измерений [19], [21], [22], ЭМ моделирования [23], [24] или их комбинации [3], [25], [26].

Одним из вариантов схем для учета влияния корпуса являются ЭС, описывающие проволочки и выводы корпуса [21], [27], где под выводами понимаются металлические контакты корпуса и переходные отверстия от внутренних контактных площадок корпуса к внешним. Пример ЭС, учитывающей разварочную проволочку и вывод корпуса, приведен на рис. 1 [21]. Такой метод позволяет учесть некоторые частотные эффекты, например, частотную дисперсию. Однако при этом ЭС является сильно упрощенной и не может обеспечить точность на частотах выше 10 ГГц.

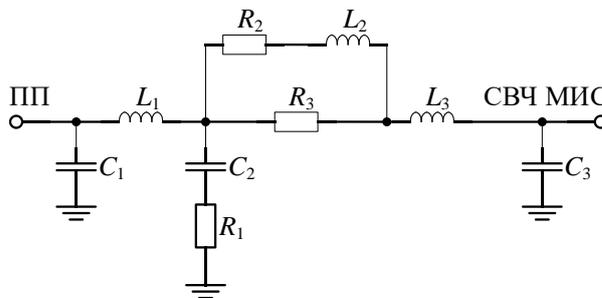


Рис. 1. Эквивалентная схема разварочной проволочки и вывода корпуса

Для более точного моделирования корпуса необходимо учитывать взаимосвязь между разварочными проволочками и сигнальными выводами корпуса. Как правило, они имеют взаимную индуктивную и емкостную связь, которая может сильнее проявляться при повышении частотного диапазона СВЧ МИС [28]. Таким образом, были разработаны ЭС с учетом емкостных и индуктивных связей между проволочками и сигнальными выводами корпуса, [3], [24], [25]. На рис. 2 изображена ЭС с учетом емкостных и индуктивных связей [3].

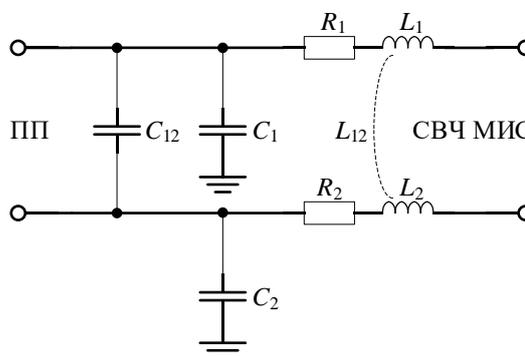


Рис. 2. Эквивалентная схема с учетом индуктивных и емкостных связей разварочных проволочек и контактов корпуса

Использование ЭС, описывающих корпус целиком, позволяет повысить точность моделирования, благодаря возможности учета неидеальности заземления в корпусе. При разработке таких ЭС используются результаты моделирования, что позволяет дополнительно оценить влияние соединения посадочного места СВЧ МИС и заземляющего контакта печатной платы (ПП). Это позволяет учесть индуктивность проводников, емкостные связи между переходными отверстиями и сопротивление металлизации [19], [22], [26]. На рис. 3 изображена ЭС корпуса, учитывающая неидеальность заземления СВЧ МИС [22].

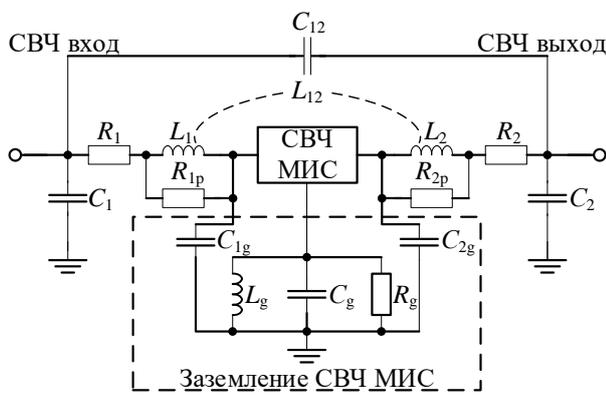


Рис. 3. Эквивалентная схема корпуса с учетом неидеальности заземления СВЧ МИС

Отдельно можно выделить ЭС, в которых предлагается использовать модели линий передач для описания разварочных проволочек и выводов корпуса [23]. Модель линии передач может быть основана на Т- или П-цепи и состоит из *RLGC* элементов, которые в QFN корпусах являются паразитными элементами и описывают потери в проводниках, индуктивность контура, диэлектрические потери и емкости между сигнальными трактами. Для улучшения точности таких моделей при повышении частоты параметры *RLGC* эквивалентной схемы делают частотно-зависимыми. Это объясняется тем, что QFN корпус является составной структурой из разварочных проволочек и выводов, что приводит к сложному электромагнитному взаимодействию, которое не может быть описано простыми моделями [23]. Таким образом, QFN корпус можно описать ЭС линии передачи с неоднородной конфигурацией поперечного сечения.

Для определения значений элементов ЭС возможно использование параметрической оптимизации или алгоритмов экстракции с последующей параметрической оптимизацией. Использование только оптимизации позволяет без использования каких-либо аналитических выражений разработать ЭС, описывающую корпус с определенной точностью. Однако при усложнении ЭС размерность становится достаточно большой, что усложняет проведение оптимизации без качественного первоначального приближения [29]. Таким образом, экстракция является необходимым шагом для получения первоначального приближения. Это позволяет не только уменьшить размерность задачи, но и получить физически правильные значения элементов ЭС. Для проведения процедуры экстракции могут использоваться специальные САПР, например, Ansys Q3D Extractor [3], [23]. Обобщенный алгоритм построения модели корпуса содержит следующие этапы:

- 1) Измерение или ЭМ моделирование корпуса;
- 2) Экстракция значений элементов ЭС корпуса при помощи специальных САПР или аналитических выражений. При использовании аналитических

выражений экстракции емкостных элементов могут использоваться матрицы *Y*- или *ABCD*-параметров [19], [23], [30]. Для экстракции индуктивных и диссипативных элементов может использоваться матрица *Z*-параметров [22], [25];

- 3) Проведение оптимизации для уточнения значений элементов.

Необходимо отметить, что основным достоинством компактных моделей корпусов по сравнению с табличными является возможность масштабирования. В работе [31] предлагают базовую подструктуру, которая представляет собой упрощенную ЭС разварочной проволочки и выводов корпуса, учитывающую емкостные и индуктивные связи. При масштабировании такие ячейки могут каскадироваться, увеличивая тем самым изменения геометрических размеров и количества выводов корпуса. Однако табличные модели в свою очередь обеспечивают более высокую точность и не требуют дополнительных затрат на построение компактной модели. Одно из наиболее интересных преимуществ компактных моделей было продемонстрировано в работе [30]. В модели реализована возможность варьировать длину разварочных проволочек. Благодаря этому становится возможным не только учет влияния корпуса, но и использование его влияния при разработке СВЧ МИС. Так, например, увеличив длину проволочек, возможно упростить согласующие цепи, уменьшить размер кристалла и, как следствие, уменьшить стоимость отдельных СВЧ МИС. Возможность варьирования проволочек существенно сокращает время на многократное моделирование, а одна модель корпуса может использоваться при разработке различных СВЧ МИС.

### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ QFN КОРПУСА

Моделирование отечественного QFN корпуса проведено в САПР Keysight PathWave EM Design (EMPro). При построении макета корпуса использовалась техническая документация. На рис. 4 изображена структура корпуса. Корпус является керамическим и имеет размеры  $3 \times 3 \text{ мм}^2$ . Он содержит посадочную площадку для СВЧ МИС, а также сигнальные и заземляющие контактные площадки. В корпусе имеются переходные отверстия для установки «нулевого» потенциала на посадочной площадке и передачи сигнала с нижней плоскости корпуса.

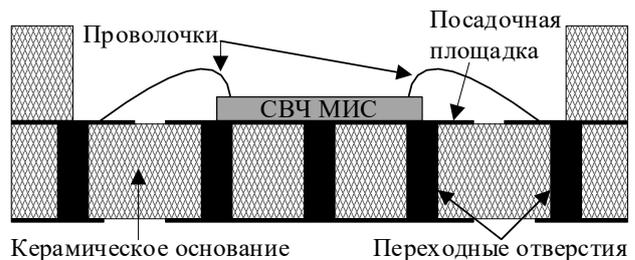


Рис. 4. Структура моделируемого корпуса

При проведении измерений корпус будет размещен на печатной плате Rogers4003. Согласно проведенному

обзору, при моделировании корпуса необходимо использовать печатную плату для явного определения нулевого потенциала в моделируемой структуре [26], [32], [33].

В рамках настоящего эксперимента, исходя из размеров корпуса и размеров кристалла, длина разварочных проволочек составила 800 мкм. На рис. 5 изображен трехмерный макет корпуса в САПР для проведения ЭМ моделирования, где 1, 2 и 3 – это внешние сигнальные выводы на печатную плату, а 4, 5 и 6 – это внутренние сигнальные выводы для СВЧ МИС.

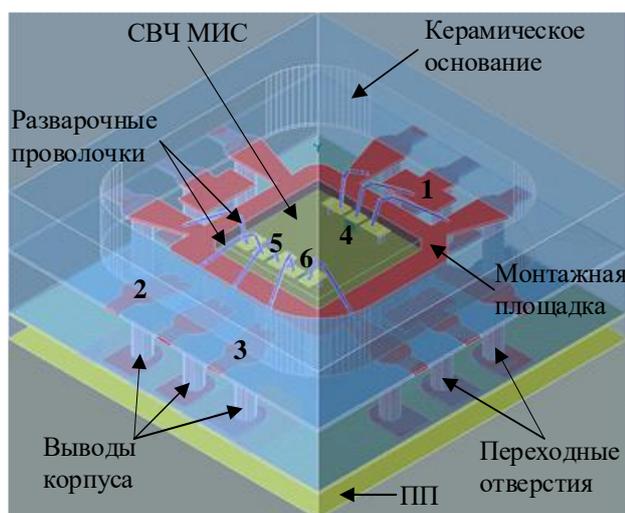


Рис. 5. Трехмерный макет корпуса в САПР

Для получения корректных данных в результате моделирования необходимо провести настройку в САПР. Основной задачей является повышение скорости расчета при сохранении достаточной точности. Рассмотрим основные параметры, используемые при настройке:

- 1) Диапазон частот для моделирования. Прежде всего он определяет диапазон, в котором мы можем использовать построенную модель и плотность построения сетки. В настоящем эксперименте будет использоваться диапазон от 0,1 ГГц до 20 ГГц. Для повышения скорости расчета может использоваться адаптивный расчет, позволяющий за счет интерполяции моделировать не все точки в диапазоне, а лишь определенную часть, зависящую от характера частотной зависимости.
- 2) Расчетная сетка. Для повышения точности моделирования следует разбивать исследуемую структуру на как можно меньшие участки. Однако это приведет к существенному увеличению времени расчета и потребует большого количества вычислительных ресурсов. К тому же, в этом нет необходимости ввиду основной концентрации ЭМ полей в переходе печатная плата – контактная площадка СВЧ МИС. Таким образом, в САПР используется режим построения сетки, позволяющий сделать ее максимально точной в областях протекания СВЧ-сигнала и увеличивающий размер сетки в местах

заземления. На рис. 6 изображен результат построения сетки для моделирования на макете корпуса. В настоящем эксперименте минимальный размер сетки составил  $10 \times 10$  мкм.

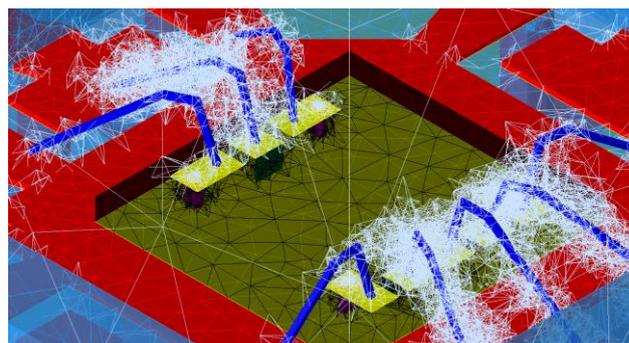


Рис. 6. Построенная расчетная сетка

- 3) Сигнальные порты. Настройка портов определяет каким образом СВЧ-сигнал будет подаваться в моделируемую структуру и выходить из нее. Сигнальные порты могут быть назначены в сечении сигнального проводника или в виде плоскости. Также может варьироваться тип подачи мощности, например, порты могут быть волноводными или дифференциальными. В нашем случае СВЧ-сигнал поступает в корпус из ПП в копланарном тракте, поэтому тип внешних портов выбран дифференциальный с шириной сигнальной линии. Для внутренних портов выбран волноводный тип портов с шириной, равной ширине контактной площадки СВЧ МИС. В качестве нулевого потенциала внутренних портов определена металлизированная посадочная площадка для СВЧ МИС. На рис. 5 изображена используемая нумерация портов.
- 4) Граничные условия. Данный параметр определяет размеры области моделирования и типы границ. Например, границы могут являться идеальными электрическими или магнитными проводниками, а также идеально отражать или пропускать СВЧ-сигнал. При моделировании нижняя граница области расчета была определена как идеальный проводник, что соответствует плоскости заземления. Для остальных граней было задано условие идеального пропускающего материала, что имитирует расположение корпуса в среде воздуха. Боковые границы области моделирования расположены вплотную к корпусу, а верхняя граница расположена на расстоянии равном десяти толщинам моделируемого корпуса.
- 5) Упрощение моделируемых структур. Настройка может использоваться для повышения скорости моделирования. Например, для сквозных отверстий, имеющих форму цилиндров построение сетки является достаточно сложной задачей, однако ее можно упростить, заменив их на  $N$ -угольники. В рамках настоящего эксперимента форма отверстий была заменена на восьмиугольники, что позволило повысить скорость моделирования без потери точности моделируемых результатов.

б) Метод решения матриц в САПР. В используемой САПР доступно параллельное или итерационное решение матриц. Метод решения определяет скорость моделирования, однако повышает требования к количеству оперативной памяти. Параллельный метод может использоваться при моделировании корпусов или структур с количеством портов более 15. При решении настоящей задачи использован итерационный метод решения.

Стоит отметить, что предварительное моделирование корпуса может позволить выбрать оптимальную конструкцию: количество и толщину технологических слоев, рекомендуемую длину разварочных провололочек и их количество. Таким образом, перечисленные параметры могут снизить влияние корпуса на основные параметры СВЧ МИС, тем самым облегчить ее разработку и дальнейший монтаж.

#### IV. ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ QFN КОРПУСА

Для верификации предложенной методики моделирования была построена табличная модель QFN корпуса, размерами  $3 \times 3 \text{ мм}^2$ . На рис. 7 изображены результаты моделирования частотных зависимостей  $S$ -параметров QFN корпуса.

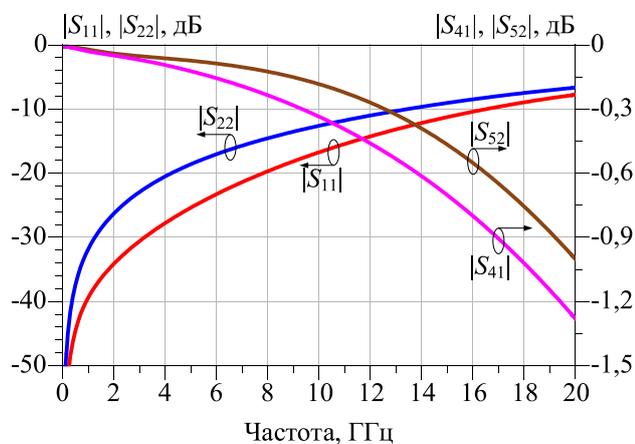


Рис. 7. Результаты ЭМ моделирования частотных зависимостей  $S$ -параметров QFN корпуса, размерами  $3 \times 3 \text{ мм}^2$

В корпусе размещена СВЧ МИС симметрирующего трансформатора (СТ), диапазона частот 2-7 ГГц. Проведены серии измерений частотных зависимостей  $S$ -параметров СТ без корпуса (СВЧ МИС) и в рассматриваемом QFN корпусе (измерения). На рис. 8 представлена фотография СВЧ МИС СТ в QFN корпусе.

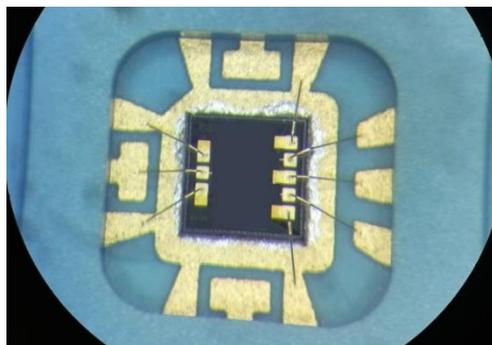


Рис. 8. Фотография СВЧ МИС СТ в корпусе

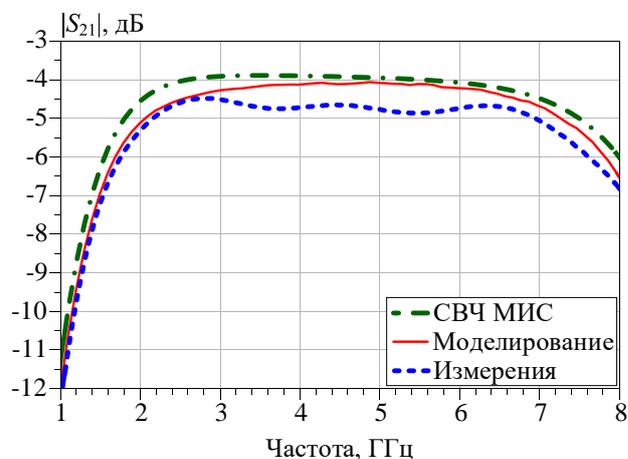


Рис. 9. Сравнение результатов измерений и моделирования коэффициента передачи

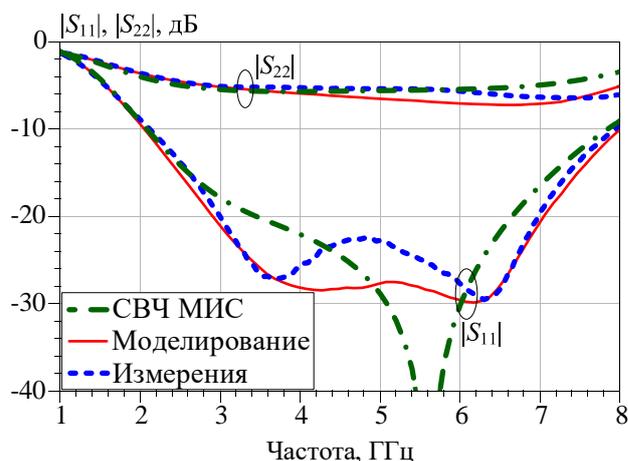
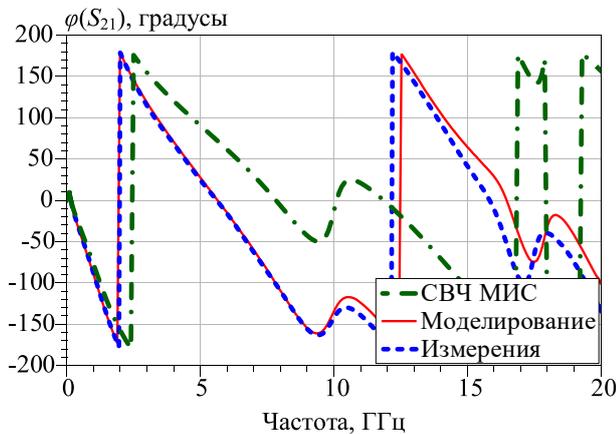


Рис. 10. Сравнение результатов измерений и моделирования коэффициентов отражения по входу и выходу



**Рис. 11. Сравнение результатов измерений и моделирования фазы коэффициента передачи**

Также рассмотрены частотные зависимости  $S$ -параметров измеренной СВЧ МИС в корпусе с использованием разработанной табличной модели (моделирование). На рис. 10, рис. 11 представлено сравнение результатов измерений и моделирования  $S$ -параметров для трех наборов данных. При верификации методики моделирования рассмотрены экспериментальные данные одного из плеч симметрирующего трансформатора. Второе плечо нагружено на согласованную нагрузку 50 Ом.

Представленные частотные зависимости демонстрируют влияние корпуса на основные параметры СТ. Фазочастотная характеристика коэффициента передачи косвенно свидетельствует о правильно выбранной длине разварочных проволочек при построении табличной модели QFN корпуса. Частотные зависимости  $S$ -параметров близки по характеру и абсолютным значениям в исследуемом диапазоне частот, что демонстрирует достоверность и эффективность предложенной методики моделирования QFN корпусов.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом работы является методика моделирования QFN корпусов, которая может использоваться при построении табличных моделей корпусов различных размеров. Для верификации предложенной методики построена табличная модель QFN корпуса, размерами  $3 \times 3 \text{ мм}^2$ . Проведено сравнение частотных зависимостей  $S$ -параметров для: измерений СВЧ МИС СТ до монтажа в корпус, характеристик СВЧ МИС СТ в корпусе с использованием разработанной табличной модели и измерений СВЧ МИС СТ в корпусе. Частотные зависимости  $S$ -параметров близки по характеру и абсолютным значениям в исследуемом диапазоне частот, что демонстрирует достоверность и эффективность предложенной методики моделирования QFN корпусов. Исходя из результатов верификации, можно сделать вывод, что возможно использование разработанной методики для построения компактной модели корпусов с возможностью масштабирования по длине

разварочных проволочек или количеству выводов. Что позволит существенно сократить время на многократное моделирование и использовать одну модель корпуса при разработке различных СВЧ МИС

Дальнейшие исследования в рамках настоящей тематики целесообразно вести в следующих направлениях: построение масштабируемой компактной модели с возможностью варьирования длин разварочных проволочек; учет внешних дестабилизирующих факторов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ayad M. et al. Packaged High Power Front-End Module for Broadband 24GHz & 28GHz 5G solutions // 2018 IEEE 5G World Forum (5GWF). IEEE, 2018. P. 299–303.
- [2] URL: <https://www.analog.com/en/design-center/packaging-quality-symbols-footprints/package-index.html> (дата обращения: 08.07.2022).
- [3] Chen N. et al. Electrical characterization and structure investigation of quad flat non-lead package for RFIC applications // Solid. State. Electron. 2003. V. 47, № 2. P. 315–322.
- [4] Woosley A. et al. Thin QFP design and development // 1992 Proceedings 42nd Electronic Components & Technology Conference. IEEE, 1992. P. 429–437.
- [5] Chung E., Xu T., Liu D. Investigation of lead cracking in TSSOP during burr-up forming process // Int. Symp. Electron. Mater. Packag. EMAP 2000. 2000. P. 409–415.
- [6] Ishitsuka F., Sato N. Low-cost, high-performance package for a multi-chip MMIC module // 10th Annual IEEE (GaAs IC) Symposium, Gallium Arsenide Integrated Circuit. Technical Digest 1988. IEEE, 1988. P. 221–224.
- [7] URL: <https://www.analog.com/en/products/hmc499-die.html> (дата обращения: 08.07.2022).
- [8] URL: <https://www.analog.com/en/products/hmc499lc4.html> (дата обращения: 08.07.2022).
- [9] URL: <https://www.qorvo.com/products/p/QPA2225> (дата обращения: 08.07.2022).
- [10] URL: <https://www.qorvo.com/products/p/QPA2225D> (дата обращения: 08.07.2022).
- [11] URL: <http://mmic.niipp.ru/catalog/product/7> (дата обращения: 08.07.2022).
- [12] URL: <http://mmic.niipp.ru/catalog/product/8> (дата обращения: 08.07.2022).
- [13] Nazarian A.L. et al. A Physics-Based Causal Bond-Wire Model for RF Applications // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2012. V. 60, № 12. P. 3683–3692.
- [14] Alimenti F. et al. Modeling and characterization of the bonding-wire interconnection // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2001. V. 49, № 1. P. 142–150.
- [15] Zhang H.S. et al. Extraction method for parasitic capacitances and inductances of HEMT models // Solid. State. Electron. 2017. V. 129. P. 108–113.
- [16] URL: <https://www.modelithics.com/Model/Models3D2> (дата обращения: 08.07.2022).
- [17] Sanjuan E.A., Cahill S.S. Low-Cost High-Bandwidth Millimeter Wave Leadframe Packages // RF Microw. Microelectron. Packag. 2010. P. 25–42.
- [18] Kalubhai A.S. Efficient Methodologies for Package / housing Effect on Active MMIC and Signal Integrity Problems: thesis for the deg. of ph. Gujarat, 2016. 91 p.
- [19] Tzyy-Sheng Horng et al. Modeling of lead-frame plastic CSPs for accurate prediction of their low-pass filter effects on RFICs // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2001. V. 49, № 9. P. 1538–1545.

- [20] Young-Ho Suh et al. A low-cost high performance GaAs MMIC package using air-cavity ceramic quad flat non-leaded package up to 40 GHz // 2005 European Microwave Conference. IEEE, 2005. V. 3. P. 1–4.
- [21] Fujiang Lin et al. An accurate RF package model for RFIC design // 1999 Asia Pacific Microwave Conference. APMC'99. Microwaves Enter the 21st Century. Conference Proceedings (Cat. No.99TH8473). IEEE, 1999. P. 952–955.
- [22] Han F.-Y. et al. Packaging effects on the figure of merit of a CMOS cascode low-noise amplifier: Flip-chip versus wire-bond // 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. IEEE, 2009. P. 601–604.
- [23] Boyu Zheng et al. Study on low-cost QFN packages for high-frequency applications // 2012 IEEE 14th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC). IEEE, 2012. P. 401–406.
- [24] Wang W., Kang W., Ku H. Design and Analysis of Bonding Wire for Ka-Band QFN Package // J. Korean Inst. Electromagn. Eng. Sci. 2021. V. 32, № 11. P. 951–958.
- [25] Yeong-Lin Lai, Cheng-Yu Ho. Electrical modeling of quad flat no-lead packages for high-frequency IC applications // 2004 IEEE Region 10 Conference TENCON 2004. IEEE, 2004. V. D. P. 344–347.
- [26] Byk E. et al. Plastic Packaged High Linearity Low Noise Amplifier for 12-30GHz Multi-band Telecom Applications // 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. IEEE, 2006. P. 1903–1906.
- [27] Rakvin B., Pivac B., Reitano R. Electron paramagnetic resonance study of amorphous silicon produced by Kr + ion implantation into silicon // J. Appl. Phys. 1997. V. 81, № 8. P. 3453–3456.
- [28] Shin D. et al. A 4-element X-band CMOS phased-array RFIC in a QFN package // 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest. IEEE, 2012. P. 1–3.
- [29] Horng T.S., Wu S.M., Shih C. Electrical modeling of RFIC packages up to 12 GHz // Proc. - Electron. Components Technol. Conf. 1999. P. 867–872.
- [30] Lin F. et al. Accurate Package Modeling Based on S-Parameter Measurements // 49th ARFTG Conference Digest. IEEE, 1997. P. 191–200.
- [31] Mandic T., Nauwelaers B.K.J.C., Baric A. Simple and Scalable Methodology for Equivalent Circuit Modeling of IC Packages // IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol. 2014. Vol. 4, № 2. P. 303–315.
- [32] Krishnamurthy S. et al. Multi design variable optimization of QFN package on thick boards for enhanced board level reliability // 2016 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). IEEE, 2016. P. 1546–1550.
- [33] Li L. Reliability modeling and testing of advanced QFN packages // 2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference. IEEE, 2013. P. 725–730.

## Modeling Technique of QFN Packages

V.I. Stepanov, A.A. Metel, A.S. Salnikov, I.M. Dobush, A.A. Kalentyev

«50ohm Lab», Tomsk State University of Control System and Radioelectronics (TUSUR),

vladislav.stepanov@50ohm.tech

**Abstract** — The purpose of this work is to derive a QFN packages modeling technique using three-dimensional electromagnetic analysis.

**Methods:** package Electromagnetic analysis, the design of microwave monolithic integrated circuit (MMIC) using package model.

**Results.** The following setting combination allow us reduce time consuming to build an accurate three-dimensional package model: simulation frequency range was selected from 0.1 GHz to 20 GHz, adaptive frequency plan was used, target mesh size was used to define mesh grid, the external ports were selected as differential and were located on the printed circuit board (PCB) transmission line side, internal ports were defined as waveguide, the die attach paddle for the MMIC in the package is considered to be the grounding plane, the lower calculation area boundary was defined as a perfect conductor, and the other boundaries were defined as a perfect transmission material, all round holes have been replaced with octagons, for matrices solving iterative method was used. As a result, obtained table-based model for QFN package with 3x3mm<sup>2</sup> total area was used in the MMIC design. Measurement results of the MMIC balancing transformer were used to verify suggested technique in the frequency range of 2-7 GHz.

**Discussion.** The developed QFN packages modeling technique can be used in the design of MMIC with package effect.

**Keywords** — Ceramic packages, QFN, MMIC, electromagnetic analysis, equivalent circuits, modeling technique.

### REFERENCES

- [1] Ayad M. et al. Packaged High Power Frond-End Module for Broadband 24GHz & 28GHz 5G solutions // 2018 IEEE 5G World Forum (5GWF). IEEE, 2018. P. 299–303.
- [2] URL: <https://www.analog.com/en/design-center/packaging-quality-symbols-footprints/package-index.html> (access date: 08.07.2022).
- [3] Chen N. et al. Electrical characterization and structure investigation of quad flat non-lead package for RFIC applications // Solid. State. Electron. 2003. V. 47, № 2. P. 315–322.
- [4] Woosley A. et al. Thin QFP design and development // 1992 Proceedings 42nd Electronic Components & Technology Conference. IEEE, 1992. P. 429–437.
- [5] Chung E., Xu T., Liu D. Investigation of lead cracking in TSSOP during burr-up forming process // Int. Symp. Electron. Mater. Packag. EMAP 2000. 2000. P. 409–415.

- [6] Ishitsuka F., Sato N. Low-cost, high-performance package for a multi-chip MMIC module // 10th Annual IEEE (GaAs IC) Symposium, Gallium Arsenide Integrated Circuit. Technical Digest 1988. IEEE, 1988. P. 221–224.
- [7] URL: <https://www.analog.com/en/products/hmc499-die.html> (access date: 08.07.2022).
- [8] URL: <https://www.analog.com/en/products/hmc499lc4.html> (access date: 08.07.2022).
- [9] URL: <https://www.qorvo.com/products/p/QPA2225> (access date: 08.07.2022).
- [10] URL: <https://www.qorvo.com/products/p/QPA2225D> (access date: 08.07.2022).
- [11] URL: <http://mmic.niipp.ru/catalog/product/7> (access date: 08.07.2022).
- [12] URL: <http://mmic.niipp.ru/catalog/product/8> (access date: 08.07.2022).
- [13] Nazarian A.L. et al. A Physics-Based Causal Bond-Wire Model for RF Applications // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2012. V. 60, № 12. P. 3683–3692.
- [14] Alimenti F. et al. Modeling and characterization of the bonding-wire interconnection // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2001. V. 49, № 1. P. 142–150.
- [15] Zhang H.S. et al. Extraction method for parasitic capacitances and inductances of HEMT models // Solid. State. Electron. 2017. V. 129. P. 108–113.
- [16] URL: <https://www.modelithics.com/Model/Models3D2> (access date: 08.07.2022).
- [17] Sanjuan E.A., Cahill S.S. Low-Cost High-Bandwidth Millimeter Wave Leadframe Packages // RF Microw. Microelectron. Packag. 2010. P. 25–42.
- [18] Kalubhai A.S. Efficient Methodologies for Package / housing Effect on Active MMIC and Signal Integrity Problems: thesis for the deg. of ph. Gujarat, 2016. 91 p.
- [19] Tzyy-Sheng Horng et al. Modeling of lead-frame plastic CSPs for accurate prediction of their low-pass filter effects on RFICs // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2001. V. 49, № 9. P. 1538–1545.
- [20] Young-Ho Suh et al. A low-cost high performance GaAs MMIC package using air-cavity ceramic quad flat non-leaded package up to 40 GHz // 2005 European Microwave Conference. IEEE, 2005. V. 3. P. 1–4.
- [21] Fujiang Lin et al. An accurate RF package model for RFIC design // 1999 Asia Pacific Microwave Conference. APMC'99. Microwaves Enter the 21st Century. Conference Proceedings (Cat. No.99TH8473). IEEE, 1999. P. 952–955.
- [22] Han F.-Y. et al. Packaging effects on the figure of merit of a CMOS cascode low-noise amplifier: Flip-chip versus wire-bond // 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. IEEE, 2009. P. 601–604.
- [23] Boyu Zheng et al. Study on low-cost QFN packages for high-frequency applications // 2012 IEEE 14th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC). IEEE, 2012. P. 401–406.
- [24] Wang W., Kang W., Ku H. Design and Analysis of Bonding Wire for Ka-Band QFN Package // J. Korean Inst. Electromagn. Eng. Sci. 2021. V. 32, № 11. P. 951–958.
- [25] Yeong-Lin Lai, Cheng-Yu Ho. Electrical modeling of quad flat no-lead packages for high-frequency IC applications // 2004 IEEE Region 10 Conference TENCON 2004. IEEE, 2004. V. D. P. 344–347.
- [26] Byk E. et al. Plastic Packaged High Linearity Low Noise Amplifier for 12-30GHz Multi-band Telecom Applications // 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. IEEE, 2006. P. 1903–1906.
- [27] Rakvin B., Pivac B., Reitano R. Electron paramagnetic resonance study of amorphous silicon produced by Kr + ion implantation into silicon // J. Appl. Phys. 1997. V. 81, № 8. P. 3453–3456.
- [28] Shin D. et al. A 4-element X-band CMOS phased-array RFIC in a QFN package // 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest. IEEE, 2012. P. 1–3.
- [29] Horng T.S., Wu S.M., Shih C. Electrical modeling of RFIC packages up to 12 GHz // Proc. - Electron. Components Technol. Conf. 1999. P. 867–872.
- [30] Lin F. et al. Accurate Package Modeling Based on S-Parameter Measurements // 49th ARFTG Conference Digest. IEEE, 1997. P. 191–200.
- [31] Mandic T., Nauwelaers B.K.J.C., Baric A. Simple and Scalable Methodology for Equivalent Circuit Modeling of IC Packages // IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol. 2014. Vol. 4, № 2. P. 303–315.
- [32] Krishnamurthy S. et al. Multi design variable optimization of QFN package on thick boards for enhanced board level reliability // 2016 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). IEEE, 2016. P. 1546–1550.
- [33] Li L. Reliability modeling and testing of advanced QFN packages // 2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference. IEEE, 2013. P. 725–730.