

Рис. 4. Временной отклик на трапецеидальный импульс для структуры с двукратным МР без магнитодиэлектрического покрытия и с ним (а), а также формы наведенного напряжения на центральный проводник ТЕМ-камеры (б)

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01331).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Харлов Н.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.
2. Хасан А. Алхадж, Жечев Е.С., Газизов Т.Р. Оценка излучаемых эмиссий структуры с однократным модальным резервированием // Электронные средства и системы управления. – 2020. – С. 250–253.
3. Демаков А.В., Комнатнов М.Е. Разработка ТЕМ-камеры для испытаний интегральных схем на электромагнитную совместимость // Доклады ТУСУР. – 2018. – С. 52–55.
4. Беспалова Е.Е., Беляев А.А., Широков В.В. Радиопоглощающие материалы для СВЧ-излучения высокой мощности // Труды ВИАМ. – 2015. – № 3. – С. 45–51.

УДК 621.382.334

#### ПАЗАРИТНАЯ ЁМКОСТЬ ПОСАДОЧНОГО МЕСТА С УЧЁТОМ ПРИПОЯ НА ЭЛЕКТРОДАХ ТРАНЗИСТОРА

*И.И. Николаев, А.А. Дроздова, аспиранты*

*Научный руководитель М.Е. Комнатнов, доцент каф. ТУ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, nikolaev.727@yandex.ru*

Представлена квазистатическая модель посадочного места корпуса транзистора для поверхностного монтажа на печатной плате с учётом припоя. Вычислены матрицы коэффициентов электростатической индукции посадочных мест с учётом припоя для биполярного (BFU590G) и полевого (IRFZ46) транзисторов. На основе вычис-

ленных значений создана усовершенствованная SPICE-модель транзистора, отличающаяся учетом паразитной емкости посадочного места и электродов компонента.

**Ключевые слова:** транзистор, матрица коэффициентов электростатической индукции, посадочное место, SPICE-модель.

При проектировании радиоэлектронных средств (РЭС) необходимо учитывать не только взаимосвязи проводников на печатной плате (ПП), но и паразитные параметры посадочных мест компонентов, поскольку неучёт последних может привести к нежелательным последствиям при эксплуатации. Так, в работе [1] показано, что некорректная трассировка двух идентичных схем с их зеркальным расположением ПП может привести к серьёзным последствиям за счёт взаимных электромагнитных связей проводников ПП и оказать негативное влияние на работу комплекса РЭС. В работе [2] выполнен анализ геометрических размеров посадочного места конденсатора. Представлены результаты распределения плотности тока и температуры припоя посадочного места. Анализ результатов показал, что увеличение толщины слоя припоя приводит к уменьшению амплитуд пиковых значений плотности тока и температуры. Таким образом, необходимо проводить моделирование с учётом припоя на электродах компонентов, а при проектировании учитывать паразитную ёмкость посадочного места с учётом припоя.

Цель данной работы – выполнить расчёт паразитной ёмкости посадочного места транзистора с учётом слоя припоя.

Для моделирования выбраны два типоразмера SOT223 и TO-220, которые соответствуют биполярному (BFU590G) и полевому (IRFZ46N) типам транзисторов соответственно. Данные транзисторы выбраны, поскольку имеют разные принципы действия, а также области применения. Так, биполярный  $n-p-n$ -транзистор BFU590G применяется при проектировании различных СВЧ-устройств с рабочей частотой до 2 ГГц и мощностью до 2 Вт. Полевой транзистор с  $n$ -каналом создан по технологии HEXFET Power MOSFET, используется при проектировании различных силовых устройств (импульсные преобразователи, источники питания и пр.) с максимальным импульсным током стока до 53 А.

На рис. 1 представлены геометрическая (см. рис. 1, а) и квазистатическая (см. рис. 1, б) модели посадочного места транзистора для поверхностного монтажа. Квазистатическая модель была создана в ПО TALGAT [3] с применением модуля «MOM3D». Квазистатическая модель позволяет легко изменять геометрические параметры и получать требуемые размеры посадочного места для заданного типоразмера транзистора как с учётом слоя припоя, так и без него.

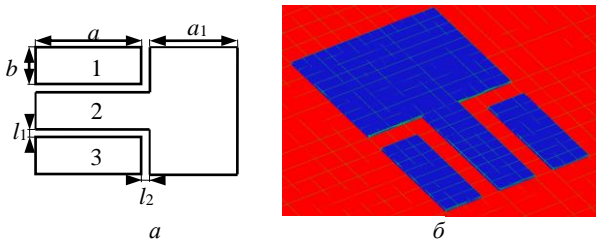


Рис. 1. Геометрическая (а) и квазистатическая (б) модели посадочного места транзистора для поверхностного монтажа

На основе технической документации для данных типов транзисторов [4, 5], созданы модели посадочных мест с минимальными и максимальными размерами и вычислены матрицы коэффициентов электростатической индукции ( $C_{\min}$ ,  $C_{\max}$ ) (таблица). При вычислениях в моделях учитывалась толщина ПП  $h = 1,6$  мм ( $\epsilon_r = 4,3$ ) и толщина посадочного места на ПП с учётом слоя припоя, которая вычислялась как

$$t = t_{\text{ПМ}} + t_{\text{П}} + t_{\text{Н}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{ПМ}}$  – толщина посадочного места на ПП без учёта слоя припоя ( $t_{\text{ф}} = 35$  мкм),  $t_{\text{П}}$  – толщина пайки,  $t_{\text{Н}}$  – толщина электродов транзистора.

**Результаты расчёта матриц коэффициентов электростатической индукции посадочных мест транзисторов BFU590G и IRFZ46N с учётом припоя и без него**

| Модель                       | $C_{\min}$ , фФ                                                                                           | $C_{\max}$ , фФ                                                                                           |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BFU590G                      | $\begin{bmatrix} 52,35 & 11,23 & 0,65 \\ 10,55 & 387,96 & 10,55 \\ 0,65 & 11,23 & 52,35 \end{bmatrix}$    | $\begin{bmatrix} 81,54 & 16,5 & 1,03 \\ 15,16 & 554,83 & 15,16 \\ 1,03 & 16,5 & 81,54 \end{bmatrix}$      |
| BFU590G<br>(С учётом припоя) | $\begin{bmatrix} 53,12 & 15,64 & 0,7 \\ 15,77 & 364 & 15,77 \\ 0,7 & 15,64 & 53,12 \end{bmatrix}$         | $\begin{bmatrix} 79,36 & 20,21 & 0,93 \\ 19,69 & 521,81 & 19,69 \\ 0,93 & 20,21 & 79,36 \end{bmatrix}$    |
| IRFZ46N                      | $\begin{bmatrix} 145,67 & 35,53 & 3,14 \\ 32,02 & 1341,26 & 32,02 \\ 3,14 & 35,53 & 145,67 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 182,68 & 38,11 & 3,11 \\ 33,98 & 1688,6 & 33,98 \\ 3,11 & 38,11 & 182,68 \end{bmatrix}$  |
| IRFZ46N<br>(С учётом припоя) | $\begin{bmatrix} 143,95 & 49,59 & 2,57 \\ 47,37 & 1315,36 & 47,37 \\ 2,57 & 49,59 & 143,95 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 180,59 & 50,38 & 2,55 \\ 47,49 & 1660,76 & 47,49 \\ 2,55 & 50,38 & 180,59 \end{bmatrix}$ |

Из результатов в таблице видно, что для BFU590G коэффициенты матриц  $C_{12}$  ( $C_{21}$ ) и  $C_{32}$  ( $C_{23}$ ), которые соответствуют паразитным ёмкостям база–эмиттер и база–коллектор, увеличились в 1,49 (1,3) и 1,39 (1,22) раза соответственно с учётом слоя припоя на ПП. Для IRFZ46N –  $C_{12}$  ( $C_{21}$ ) и  $C_{32}$  ( $C_{23}$ ), которые соответствуют паразитным ёмкостям затвор–сток и затвор–исток, увеличились в 1,39 (1,32) и 1,48 (1,39) раза, соответственно.

Таким образом, местами с наибольшим изменением паразитной ёмкости являются база–эмиттер и база–коллектор – для биполярного и затвор–сток и затвор–исток – для полевого транзисторов.

Усовершенствованные SPICE-модели транзисторов с учётом посадочных мест и слоя припоя представлены на рис. 2.

Таким образом, предложена универсальная модель посадочного места для транзистора поверхностного монтажа, позволяющая учитывать слой припоя на электродах за счёт паразитных емкостей. Модель позволяет легко изменять геометрические параметры посадочного места и получать требуемые размеры посадочного места для заданного типоразмера транзистора. На основе вычисленных значений созданы усовершенствованные SPICE-модели транзисторов, которые будут учитывать контакты посадочных мест со слоем припоя. В дальнейшем данная модель будет использована при моделировании электростатического разряда на электродах транзистора.

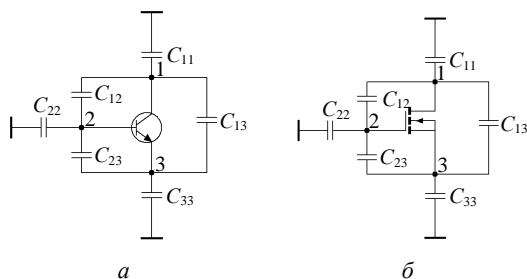


Рис. 2. Усовершенствованные SPICE-модели для биполярного (а) и полевого (б) транзисторов

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-79-10162.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Комнатнов М.Е. Предварительный анализ причин аномальной работы автогенератора Пирса / М.Е. Комнатнов, М.И. Почув // Науч.-техн. конф. молодых специалистов ОАО «ИСС». – 2014. – С. 90–92.
2. Zhao Z. The numerical investigation of influence for shape-parameters to the current carrying capacity of solder joints in the CuCGA / Z. Zhao, Y. Liu,

K. Jia, G. Wang, Q. Ge // 17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). – 2016. – P. 656–660.

3. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, С.П. Куксенко // Доклады ТУСУР. – 2015. – Т. 36, № 2. – С. 45–50.

4. BFU590G, NXP Semiconductors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BFU590G.pdf>, свободный (дата обращения: 24.02.2022).

5. IRFZ46NPbF, HEXFET Power MOSFET [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRFZ46N-DataSheet-v01\\_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a40153563b734b2220](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRFZ46N-DataSheet-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a40153563b734b2220), свободный (дата обращения: 24.02.2022).

УДК 004.416.6

## РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМЫ TALGAT

*И.А. Онищенко, студент каф. КСУП;*

*Д.В. Клюкин, магистрант каф. ТУ*

*Научный руководитель С.П. Куксенко, проф. каф. ТУ, д.т.н.*

*Проект ГПО ТУ-1502. Вычислительная ЭМС*

*г. Томск, ТУСУР, onishchenko1903@yandex.ru*

Реализовано вычисление распределения потенциалов и напряженности электрического поля методом моментов в системе TALGAT. Проведено тестирование новых функциональных возможностей.

**Ключевые слова:** напряженность электрического поля, разность потенциалов, система TALGAT.

Система TALGAT предназначена для решения широкого класса задач электромагнитной совместимости [1]. Система состоит из нескольких модулей, одним из которых является MOM2D, предназначенный для электростатического анализа двумерных конфигураций проводников и диэлектриков методом моментов. Развитие системы TALGAT ведёт к расширению существующих и внедрению новых функциональных возможностей. В настоящее время в системе отсутствует возможность отображения распределения потенциалов и напряженности электрического поля в поперечном сечении структур. Цель данной работы – внедрение в модуль MOM2D вычисления распределения потенциалов и напряженности электрического поля двумерных конфигураций.

Математическая модель вычисления распределения потенциалов и напряженности электрического поля на примере связанной микро-