

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОГЛАСОВАНИЯ GAAS КРИСТАЛЛА УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ СВЧ-ДИАПАЗОНА С КЕРАМИЧЕСКИМ КОРПУСОМ QFN

В. В. Шеденко<sup>a</sup>, С. У. Увайсов<sup>b</sup>, В. С. Иванов<sup>c</sup>, М. С. Христюк<sup>d</sup>

МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация

<sup>a</sup> ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2833-6277>, ✉ [ShedenkoVV@mail.ru](mailto:ShedenkoVV@mail.ru)

<sup>b</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>, [uvajsov@mirea.ru](mailto:uvajsov@mirea.ru)

<sup>c</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9827-1690>, [ivanov\\_vs@mirea.ru](mailto:ivanov_vs@mirea.ru)

<sup>d</sup> ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7721-3631>, [khristuk.n15@gmail.com](mailto:khristuk.n15@gmail.com)

**Аннотация:** в статье исследовано согласование GaAs СВЧ-усилителя мощности с керамическим корпусом типа QFN. Показано, что исходная конфигурация корпуса не обеспечивает требуемого согласования вследствие влияния паразитных параметров выводов, межсоединений и центральной заземляющей площадки.

Исследование основано на электромагнитном моделировании структуры «кристалл — корпус» и анализе S-параметров. Проведена модификация геометрии корпуса, включающая изменение конфигурации заземляющей площадки, сигнальных выводов и соединительных проводников. Показано, что формирование многослойной реактивной структуры позволяет улучшить согласование и снизить влияние паразитных параметров без применения дополнительных внешних согласующих цепей.

**Ключевые слова:** усилитель мощности, СВЧ-диапазон, арсенид галлия, корпус QFN, согласование импеданса, паразитные параметры, S-параметры.

**Для цитирования:** Шеденко В. В., Увайсов С. У., Иванов В. С., Христюк М. С. Исследование согласования GaAs кристалла усилителя мощности СВЧ-диапазона с керамическим корпусом QFN. *Успехи кибернетики*. 2026;7(2):84–93.

Поступила в редакцию: 11.05.2026.

В окончательном варианте: 20.05.2026.

## IMPEDANCE MATCHING OF A GAAS MICROWAVE POWER AMPLIFIER DIE TO A CERAMIC QFN PACKAGE

V. V. Shedenko<sup>a</sup>, S. U. Uvaysov<sup>b</sup>, V. S. Ivanov<sup>c</sup>, M. S. Hristyuk<sup>d</sup>

MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

<sup>a</sup> ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2833-6277>, ✉ [ShedenkoVV@mail.ru](mailto:ShedenkoVV@mail.ru)

<sup>b</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>, [uvajsov@mirea.ru](mailto:uvajsov@mirea.ru)

<sup>c</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9827-1690>, [ivanov\\_vs@mirea.ru](mailto:ivanov_vs@mirea.ru)

<sup>d</sup> ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7721-3631>, [khristuk.n15@gmail.com](mailto:khristuk.n15@gmail.com)

**Abstract:** we studied impedance matching between a GaAs microwave power amplifier and a ceramic QFN package. We showed that the initial package configuration does not provide adequate impedance matching due to parasitic effects from the package leads, bond wires, and the central ground pad. We based the analysis on electromagnetic simulations of the die–package structure and S-parameter evaluation. We then modified the package geometry by adjusting the ground pad layout, signal leads, and bond-wire interconnects. We showed that introducing a multistage reactive structure improves impedance matching and reduces the influence of parasitic elements without the need for external matching circuits.

**Keywords:** power amplifier, microwave frequency range, gallium arsenide, QFN package, impedance matching, parasitic parameters, S-parameters.

**Cite this article:** Shedenko V. V., Uvaysov S. U., Ivanov V. S., Hristyuk M. S. Impedance Matching of a GaAs Microwave Power Amplifier Die to a Ceramic QFN Package. *Russian Journal of Cybernetics*. 2026;7(2):84–93.

Original article submitted: 11.05.2026.

Revision submitted: 20.05.2026.

### Введение

Усилители мощности СВЧ-диапазона на арсениде галлия широко применяются в радиолокационных и телекоммуникационных системах [1]. При работе в диапазоне 9–11 ГГц паразитные

параметры корпуса начинают существенно влиять на импедансные характеристики активного кристалла.

Корпуса типа QFN широко используются в СВЧ-устройствах благодаря малым габаритам и эффективному теплоотводу [2]. Однако паразитные параметры выводов, bond-wire соединений и заземляющей площадки могут ухудшать согласование усилителя.

Целью работы является исследование влияния конструктивных параметров QFN-корпуса на согласование GaAs СВЧ-усилителя мощности и разработка подхода к его улучшению без применения внешних согласующих цепей.

### Анализ предметной области и постановка задачи

В диапазоне 9–11 ГГц выводы, bond-wire соединения и центральная заземляющая площадка корпуса QFN формируют распределенную реактивную структуру, существенно влияющую на входной и выходной импедансы усилителя [3]. Паразитная индуктивность выводов совместно с емкостями относительно заземляющей области ухудшает согласование и изменяет характеристики системы «кристалл — корпус».

Центральная заземляющая площадка обеспечивает теплоотвод и одновременно влияет на распределение токов возврата и паразитные связи между цепями устройства. В результате характеристики кристалла в составе корпуса могут существенно отличаться от параметров отдельного кристалла.

В работе исследуется система «кристалл — корпус QFN» с неудовлетворительным входным согласованием исходной конфигурации. Требовалось обеспечить  $|S_{11}| \leq -10$  дБ и  $|S_{22}| \leq -4$  дБ в диапазоне 9–11 ГГц при сохранении требуемого усиления путем модификации геометрии корпуса без применения внешних согласующих цепей.

### Методика моделирования и исходная модель

Исследование проводилось в среде Keysight ADS с использованием электромагнитного решателя Momentum [4, 5]. Корпус QFN моделировался как многослойная структура с учетом сигнальных выводов, центральной заземляющей площадки и bond-wire соединений.

Кристалл усилителя мощности задавался двухпортовой моделью S2P, подключенной к электромагнитной модели корпуса, представленной файлом S4P (рис. 1). Формировалась комбинированная модель системы «кристалл — корпус» [6].

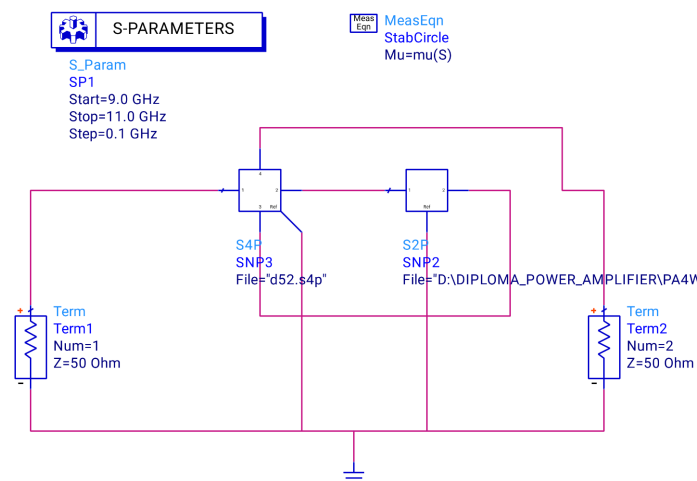


Рис. 1. Эквивалентная схема структуры «кристалл — корпус»

Входной импеданс системы «кристалл — корпус» может быть представлен в виде формулы (1):

$$Z_{in} = R_{in} + j\omega L_{in} + \frac{1}{j\omega C_{in-paddle}}, \quad (1)$$

где  $L_{in}$  — индуктивность соединительных проводников,  $C_{in}$  — паразитная емкость между входной цепью и центральной заземляющей площадкой.

Выходной импеданс системы «кристалл — корпус» может быть представлен в виде формулы (2):

$$Z_{out} = R_{out} + j\omega L_{out} + \frac{1}{j\omega C_{out-paddle}}, \quad (2)$$

где  $L_{out}$  — индуктивность соединительных проводников,  $C_{out}$  — паразитная емкость между выходной цепью и центральной заземляющей площадкой.

Комплексная проводимость паразитного взаимодействия через общую заземляющую область может быть оценена выражением (3):

$$Y_{fb} \approx j\omega C_{in-paddle} + j\omega C_{out-paddle} + Y_{gnd}, \quad (3)$$

где  $Y_{fb}$  — эквивалентная комплексная проводимость паразитного взаимодействия,  $Y_{gnd}$  — комплексная проводимость общей области заземления.

### Результаты моделирования и оптимизация конструкции корпуса

На первом этапе выполнено моделирование исходной конструкции корпуса QFN с подключенным кристаллом усилителя мощности (рис. 2). Исходная конфигурация корпуса характеризовалась реактивной структурой, не обеспечивающей требуемого согласования в диапазоне 9–11 ГГц.

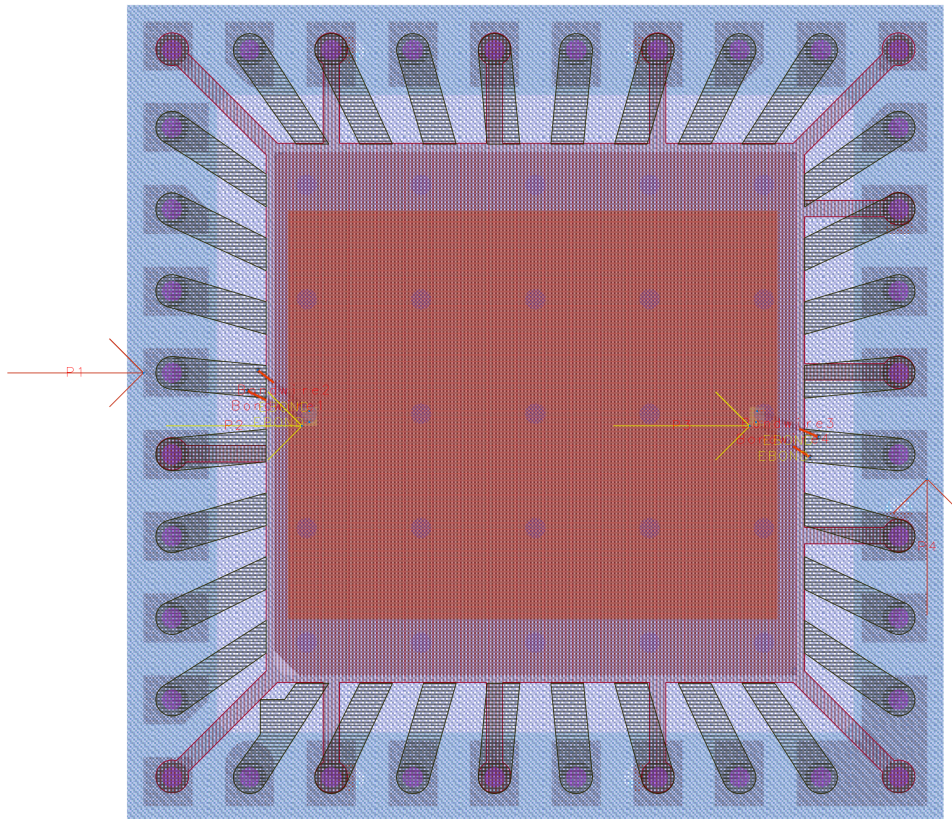
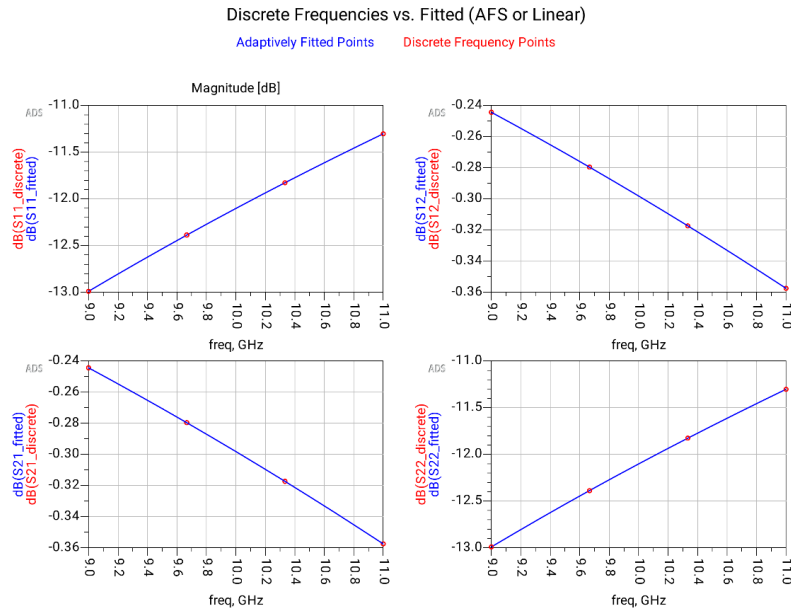


Рис. 2. Исходная геометрия корпуса

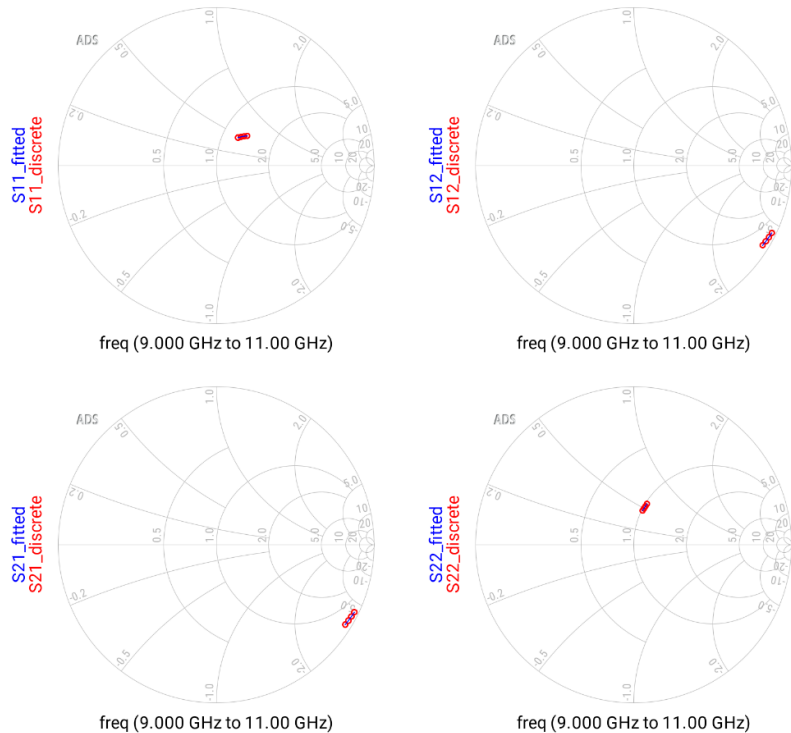
Для оценки влияния конструкции корпуса были проанализированы S-параметры в диапазоне частот 9–11 ГГц. На рисунке 3 представлены амплитудные характеристики  $|S_{11}|$ ,  $|S_{21}|$ ,  $|S_{12}|$  и  $|S_{22}|$  исходной конфигурации корпуса. Повышенный уровень  $|S_{11}|$  указывает на недостаточное входное согласование, обусловленное паразитной индуктивностью выводов и недостаточной емкостной компенсацией со стороны центральной заземляющей площадки.

Для анализа импедансных характеристик на рисунке 4 приведены диаграммы Смита входного и выходного коэффициентов отражения. Входной импеданс смещен в индуктивную об-



**Рис. 3.** Амплитудные характеристики  $S$ -параметров исходной конфигурации корпуса  $QFN$  без подключенного кристалла

ласть, что указывает на влияние паразитной индуктивности сигнальных выводов и проволочных межсоединений.



**Рис. 4.** Диаграммы Смита  $S$ -параметров исходной конфигурации корпуса  $QFN$  без подключенного кристалла

Амплитудные характеристики позволяют оценить согласование, а диаграммы Смита — характер реактивных составляющих импеданса. Для исходной конфигурации коэффициент отражения  $|S_{11}|$  превышает уровень  $-10$  дБ, что обусловлено паразитной индуктивностью выводов и недостаточной емкостной компенсацией относительно центральной заземляющей площадки.

На рисунке 5 представлены  $S$ -параметры системы «кристалл — корпус» в диапазоне 9–11

ГГц. После подключения кристалла коэффициент передачи  $|S_{21}|$  составляет 23–25 дБ. При этом  $|S_{11}|$  достигает  $-17...-18$  дБ на нижней границе диапазона, однако с ростом частоты ухудшается до  $-7$  дБ. Коэффициент  $|S_{22}|$  также имеет выраженную частотную зависимость с наиболее низкими значениями в области 9.7–10 ГГц, что связано с влиянием паразитных параметров корпуса.

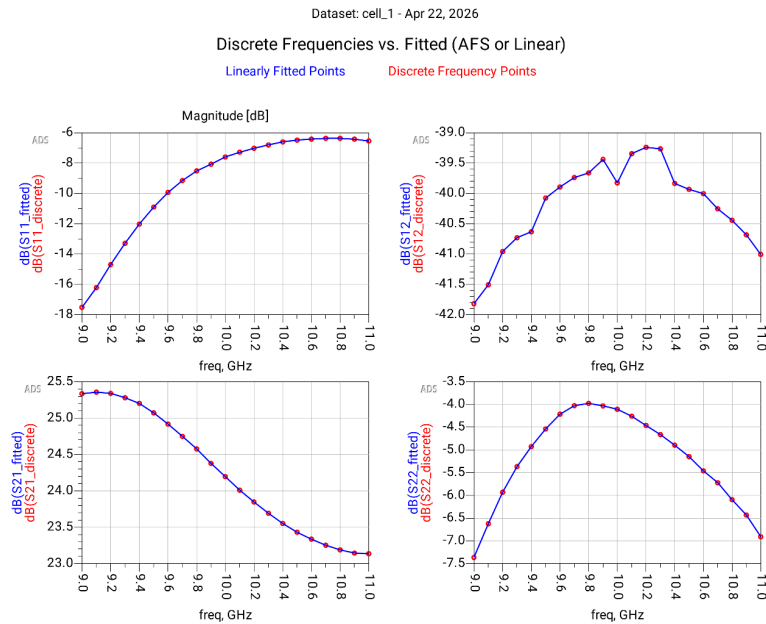


Рис. 5. Амплитудные характеристики  $S$ -параметров системы «кристалл — корпус» в исходной конфигурации корпуса QFN

Диаграммы Смита (рис. 6) подтверждают индуктивный характер входного импеданса. Смещение траектории  $S_{11}$  относительно центра диаграммы обусловлено паразитной индуктивностью выводов и проволочных соединений.

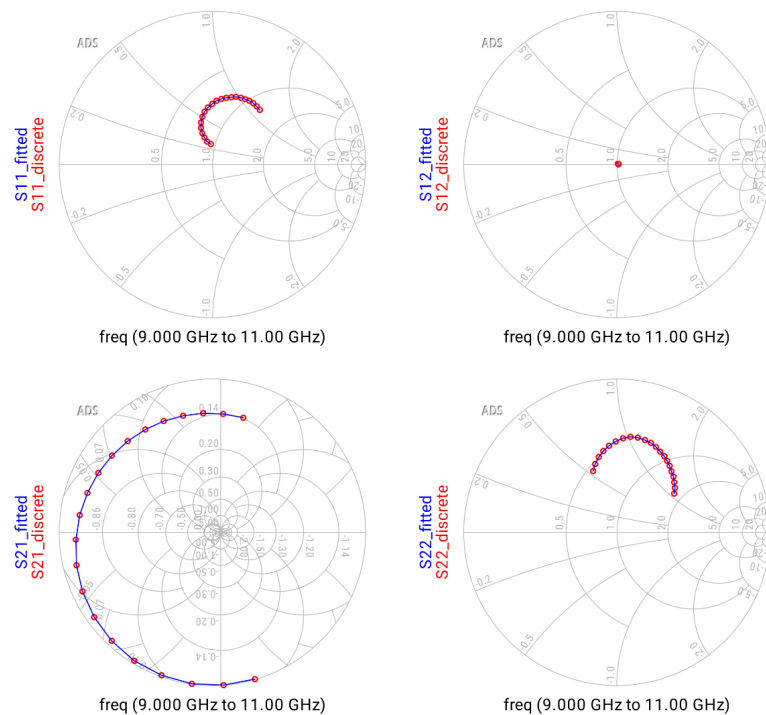
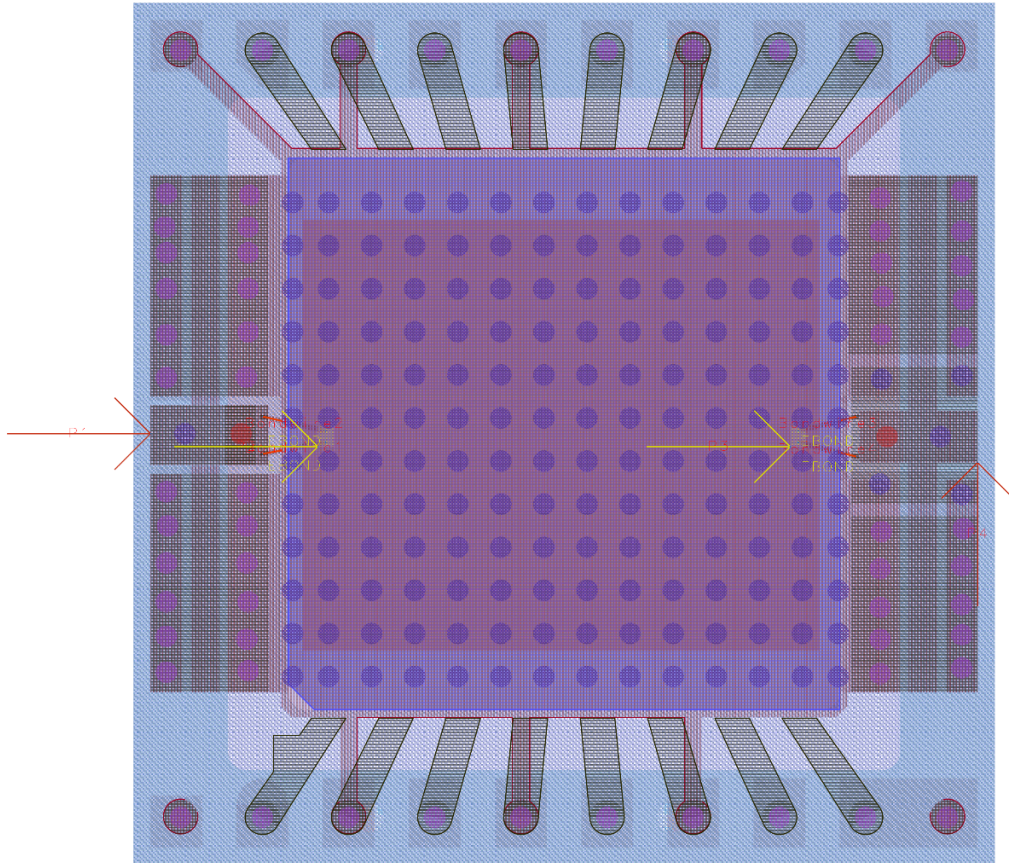


Рис. 6. Диаграммы Смита  $S$ -параметров системы «кристалл — корпус» в исходной конфигурации корпуса QFN

Исходная конфигурация корпуса не обеспечивает требуемого согласования вследствие влияния паразитных реактивных параметров. Для улучшения характеристик была выполнена корректировка геометрии корпуса, направленная на увеличение распределенной емкости относительно заземляющей области и формирование многозвенной реактивной структуры.

Основные изменения включали увеличение емкости между сигнальными выводами и заземляющей площадкой, оптимизацию топологии проводников с учетом индуктивности bond-wire соединений и выводов, а также увеличение числа заземляющих переходных отверстий. В результате сформирована реактивная структура типа  $C-L-C-L-C-L$  на входе и  $L-C-L-C-L-C$  на выходе [7], обеспечивающая более эффективное преобразование импеданса и частичную компенсацию паразитной индуктивности (рис. 7).



**Рис. 7.** Модифицированная геометрия корпуса

Указанные изменения направлены на формирование распределенной реактивной структуры корпуса за счет увеличения распределенной емкости относительно заземляющей области и использования индуктивности выводов и bond-wire соединений. В отличие от исходной конфигурации, характеризующейся выраженным индуктивным характером импеданса, модифицированная геометрия обеспечивает частичную компенсацию паразитной индуктивности и более равномерное преобразование импеданса.

Реализация последовательности реактивных элементов, эквивалентной многозвенной цепи типа  $C-L-C-L-C-L$  на входе и  $L-C-L-C-L-C$  на выходе, позволяет снизить уровень отражения и улучшить согласование в рабочем диапазоне частот.

Результаты моделирования (рис. 8) показывают, что после модификации корпуса коэффициенты отражения  $|S_{11}|$  и  $|S_{22}|$  снижаются до уровня менее  $-15$  дБ в значительной части рассматриваемого диапазона частот, что свидетельствует об улучшении согласования по сравнению с исходной конфигурацией.

Для подтверждения эффективности реализованной многозвенной реактивной структуры и анализа импедансных характеристик на рисунке 9 приведены диаграммы Смита S-параметров модифицированной конфигурации корпуса.

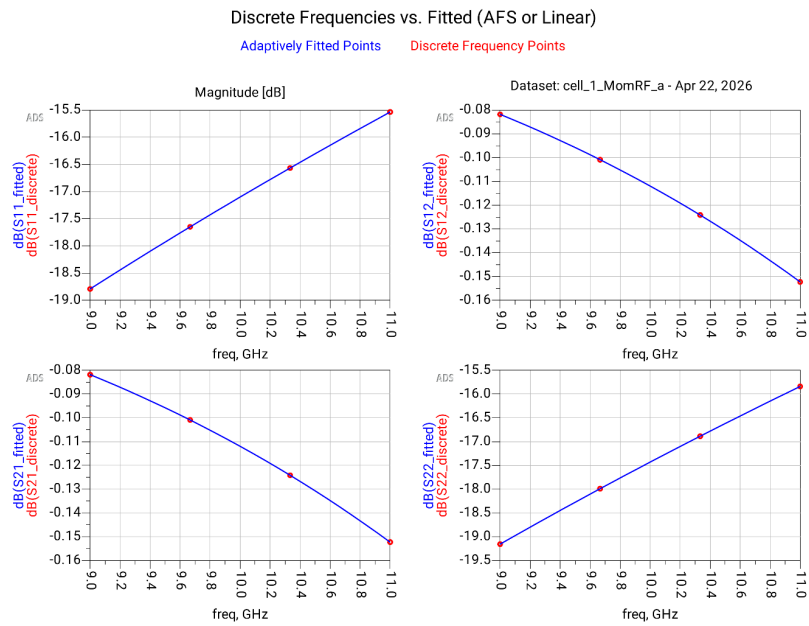


Рис. 8. Амплитудные характеристики  $S$ -параметров модифицированной конфигурации корпуса QFN без подключенного кристалла

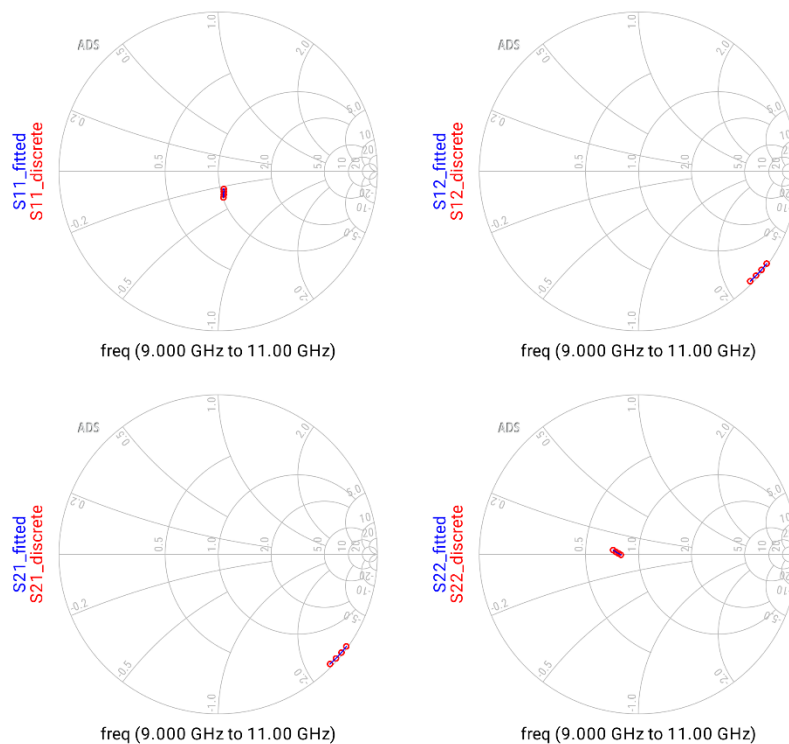
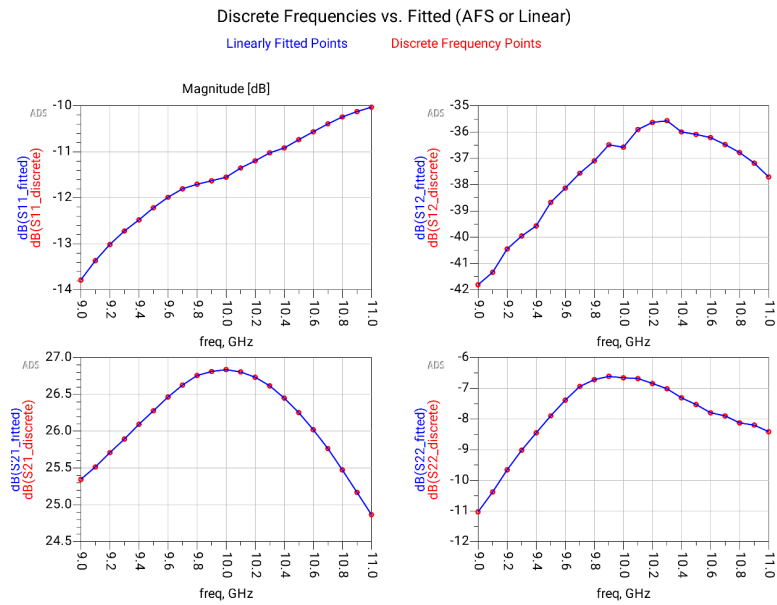


Рис. 9. Диаграммы Смита  $S$ -параметров модифицированной конфигурации корпуса QFN без подключенного кристалла

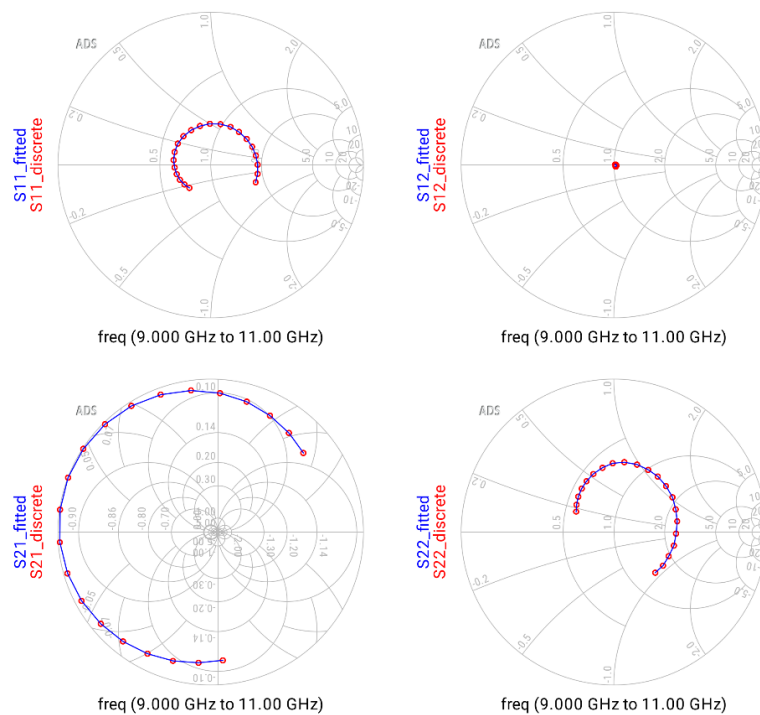
Диаграммы Смита показывают смещение траекторий коэффициентов отражения к центру диаграммы, что свидетельствует об улучшении согласования по сравнению с исходной конфигурацией.

На рисунке 10 представлены  $S$ -параметры системы «кристалл — модифицированный корпус». Коэффициент  $|S_{11}|$  находится на уровне  $-10...-14$  дБ, а  $|S_{22}|$  —  $-6...-8$  дБ. Уровень обратной передачи  $|S_{12}|$  не превышает  $-35$  дБ, что свидетельствует о достаточной развязке между входной и выходной цепями.



**Рис. 10.** Амплитудные характеристики  $S$ -параметров системы «кристалл — модифицированный корпус QFN»

Оптимизация конструкции корпуса позволила улучшить согласование кристалла без применения внешних согласующих цепей. На рисунке 11 приведены диаграммы Смитта  $S$ -параметров системы «кристалл — корпус», подтверждающие уменьшение реактивной составляющей импеданса.



**Рис. 11.**  $S$ -параметры системы «кристалл — модифицированный корпус» на диаграмме Смитта

Для оценки влияния модификации корпуса выполнено сравнение  $S$ -параметров системы «кристалл — корпус» для исходной и модифицированной конфигураций корпуса. Амплитудные характеристики и диаграммы Смитта приведены на рисунках 12 и 13.

Как следует из рисунка 12, модификация корпуса приводит к улучшению согласо-

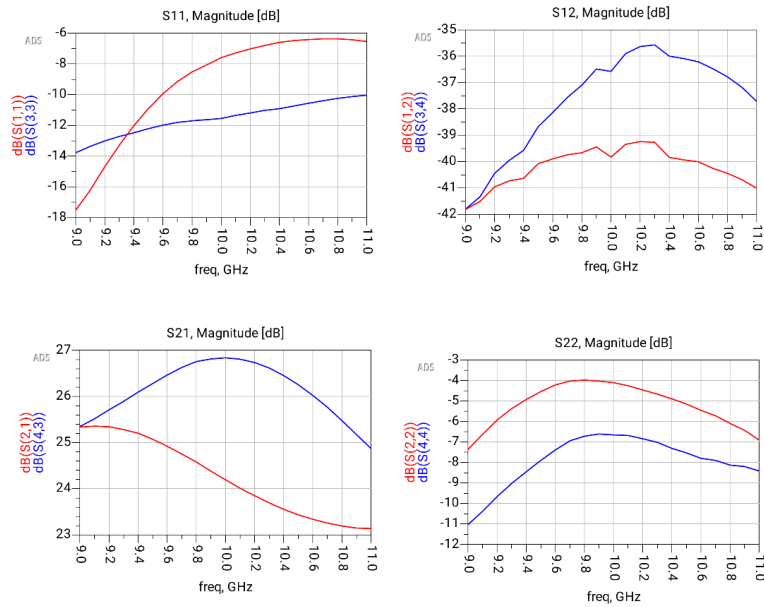


Рис. 12. Амплитудные характеристики  $S$ -параметров системы «кристалл – корпус» для исходной и модифицированной конфигураций корпуса QFN

ния. Коэффициент отражения  $|S_{11}|$  для модифицированной конфигурации (S(3,3)) находится на уровне  $-10 \dots -12$  дБ, тогда как для исходной конфигурации (S(1,1)) на верхней границе диапазона ухудшается до  $-6 \dots -8$  дБ.

Аналогичное улучшение наблюдается для  $|S_{22}|$ : для модифицированного корпуса значения составляют  $-7 \dots -9$  дБ (S(4,4)) против  $-4 \dots -6$  дБ для исходной конфигурации. Коэффициент передачи  $|S_{21}|$  достигает 26–27 дБ (S(4,3)) и имеет более равномерную частотную зависимость.

Уровень обратной передачи  $|S_{12}|$  в обеих конфигурациях не превышает  $-35$  дБ, что свидетельствует о достаточной развязке между входной и выходной цепями. Диаграммы Смитта для обеих конфигураций приведены на рисунке 13.

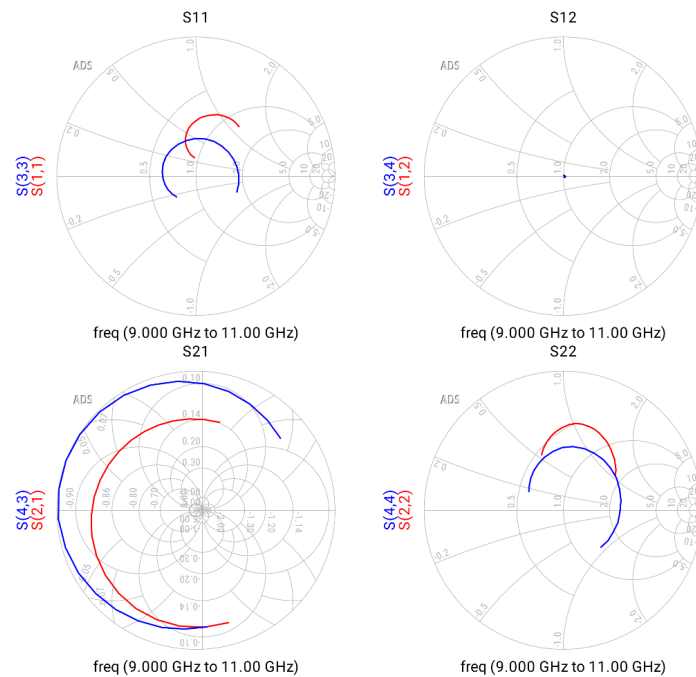


Рис. 13. Диаграммы Смитта  $S$ -параметров системы «кристалл – корпус» для исходной и модифицированной конфигураций корпуса QFN

Диаграммы Смита показывают смещение траекторий коэффициентов отражения  $S(3,3)$  и  $S(4,4)$  к центру диаграммы, что свидетельствует о снижении реактивной составляющей импеданса и частичной компенсации паразитной индуктивности.

### Заключение

В работе исследовано влияние конструктивных параметров QFN-корпуса на согласование GaAs СВЧ-усилителя мощности. Электромагнитное моделирование системы «кристалл — корпус» показало, что исходная конфигурация характеризуется выраженным индуктивным характером импеданса и недостаточной емкостной компенсацией относительно заземляющей области, что ухудшает согласование.

Корректировка геометрии корпуса, направленная на формирование многозвенной реактивной структуры, позволила улучшить импедансное согласование без применения внешних согласующих цепей. В результате достигнут уровень  $|S_{11}|$  ниже  $-10$  дБ в значительной части диапазона 9–11 ГГц при улучшении  $|S_{22}|$  и сохранении требуемого усиления.

Научная новизна работы заключается в демонстрации возможности использования паразитных элементов QFN-корпуса в качестве распределенной согласующей структуры для формирования требуемых импедансных характеристик усилителя.

В работе использовалось детерминированное электромагнитное моделирование с фиксированными значениями параметров. Однако на практике физико-механические свойства материалов корпуса и геометрические размеры имеют технологические разбросы. Методология учета таких разбросов на основе многократных расчетов (имитационного моделирования) применительно к механическим воздействиям на печатные узлы изложена в [8]. Адаптация данного подхода к анализу статистических вариаций S-параметров усилителя с корпусом QFN рассматривается как направление дальнейших исследований.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Lai Y. L., Ho C. Y. Electrical Modeling of Quad Flat No-Lead Packages for High-Frequency IC Applications. *2004 IEEE Region 10 Conference TENCN*. 2004;4:344–347. DOI: 10.1109/TENCN.2004.1414940.
2. Lu A. C. W., Xie D. J., Shi Z. F., Ryu W. Electrical and Thermal Modelling of QFN Packages. *Proceedings of 3rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2000)*. 2000:352–356. DOI: 10.1109/EPTC.2000.906399.
3. Гагарина Л. Г., Рубцов Ю. В. Особенности разработки метода классификации плоских QFN-корпусов для применения в составе автоматизированных систем технической подготовки производства изделий микроэлектроники. *Известия вузов. Электроника*. 2022;27(3):322–332. DOI: 10.24151/1561-5405-2022-27-3-322-332.
4. Степанов В. И., Метель А. А., Сальников А. С., Добуш И. М., Калентьев А. А. Методика моделирования QFN корпусов и ее верификация. *Проблемы развития перспективных микро- и наноэлектронных систем*. 2022;3:74–81. DOI: 10.31114/2078-7707-2022-3-74-81.
5. Ищенко Е. А., Пастернак Ю. Г., Пендюрин В. А., Проскурин Д. К., Федоров С. М. Применение эквивалентных схем PIN-диодов и МЭМС-ключей в задачах электродинамического моделирования. *Труды учебных заведений связи*. 2023;9(4):21–33. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-4-21-33.
6. Sun H., Zhu B., Sun L., Li H., Yang L. EMC Computer Modelling and Simulation of Integrated Circuits in QFN Package. *Progress in Electromagnetics Research M*. 2013;33:263–275. DOI: 10.2528/PIERM13082802.
7. Singh S., Chawla P. Broadband Impedance Matching Network Design for RF Power Amplifier in 5G Frequency Band. *2021 2nd International Conference for Emerging Technology (INCET)*. 2021:1–4. DOI: 10.1109/INCET51464.2021.9456168.
8. Битюков В. К., Долматов А. В., Задерновский А. А., Стариковский А. И., Увайсов Р. М. Расчет допустимых отклонений виброускорений печатных узлов методом имитационного моделирования. *Russian Technological Journal*. 2023;11(6):28–38. DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-28-38>.