

Электродинамическое моделирование волноводного СВЧ-усилителя

Александр Курушин (Москва)

С помощью программы FEKO выполнено электродинамическое моделирование и оптимизация транзисторного СВЧ-усилителя. СВЧ-транзистор, описанный своими S-параметрами, включен в волноводную СВЧ-структуру. Для повышения устойчивости усилителя предложено создать структуру, состоящую из двух повернутых на 90° волноводов.

Электродинамический расчёт СВЧ-структур, которые содержат активные элементы, открывает новые возможности как для улучшения характеристик традиционных структур, так и для создания таких уникальных структур, как волноводный многотранзисторный СВЧ-усилитель.

Одной из задач, которую можно решить с использованием электродинамического подхода, является проектирование транзисторного усилителя СВЧ (ТУ СВЧ) в корпусе, в волноводе и в резонансных структурах. Известно, что от этого зависит устойчивость работы ТУ СВЧ, а также его шумовые и усилительные свойства, включая частотную характеристику и согласование в широком диапазоне частот [1, 2].

Рассмотрим типичный однокаскадный волноводный ТУ СВЧ (см. рис. 1), который состоит из отрезка волновода, микрополосковой платы на диэлектрической подложке с высокой диэлектрической проницаемостью и со-

гласующих структур. Транзисторные усилители в волноводном исполнении предпочтительны, начиная с 10 ГГц, когда возросшие потери микрополосковых линий начинают вносить значительный вклад в коэффициент шума усилителя.

СОВМЕСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ-СТРУКТУРЫ И АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Активные элементы включаются в СВЧ-структуру в точках, и, следовательно, необходимо объединение электродинамического метода расчёта и метода, основанного на теории цепей. Метод Олинера [1], который чаще всего применяется для расчёта активных СВЧ-схем, является по сути методом теории цепей, который использует модели распределённых цепей в виде дискретных элементов и не учитывает связь по ближнему полю между элементами, входящими в структуру. Такой подход, например, ре-

ализован в широко распространённой программе Microwave Office [3], в которой моделирование выполняется в схемном и топологическом представлении (см. рис. 2). Если СВЧ-структура рассчитывается в программе EMSight [3], в которой выполняется электродинамический расчёт, то S-параметры или модель активных элементов добавляются на уровне схемы, т.е. узлы активных элементов подключаются к внутренним портам структуры ТУ СВЧ. Аналогичное объединение решений, полученных разными методами, выполняется в программе HFSS Designer (см. рис. 2).

Подход, реализованный в программе FEKO [4], предполагает включение активного элемента в электродинамическую структуру (см. рис. 2). Здесь сначала выполняется расчёт методами теории цепей, а затем – электродинамический анализ. В этом случае взаимная связь входной и выходной согласующей структуры учитывается автоматически, и появляется возможность рассчитать характеристики ближнего и дальнего поля структуры, в которую включены активные элементы. Транзистор будет включен во внутренние порты, созданные в разрыве входной и выходной согласующей структуры (см. рис. 3). В расчёте волноводного СВЧ-усилителя используем транзистор, па-

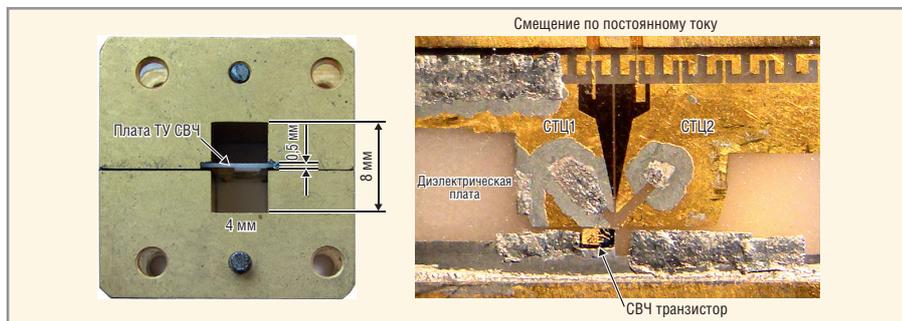


Рис. 1. Фотография однотранзисторного волноводного СВЧ-усилителя на диэлектрической подложке



Рис. 2. Два метода объединения неизлучающей цепи (транзистора и электродинамической структуры)

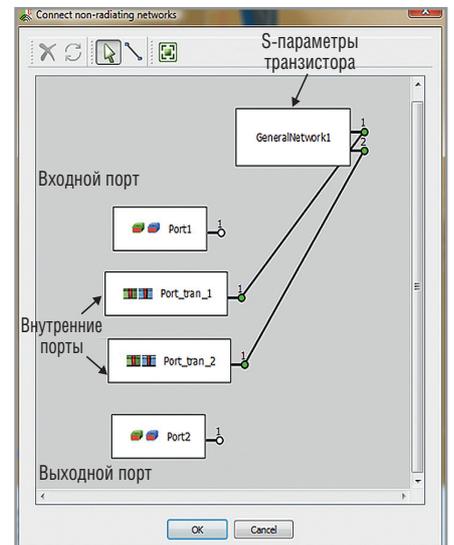


Рис. 3. Подключение S-параметров транзистора к внутренним портам 2 и 4 транзисторного СВЧ-усилителя в диалоге программы FEKO

параметры которого в формате Touchstone приведены в таблице.

Модель транзистора, заданная в виде таблицы S-параметров, включается в структуру СВЧ-усилителя в виде четырёхполюсника. Этот четырёхполюсник называется неизлучающей цепью и подключается к внутренним портам структуры. Соединение неизлучающей цепи с СВЧ-структурой выполняется в диалоге, как показано на рисунке 3. Многополюсник может быть определён в терминах S-, Y- или Z-параметров, или импортирован как внешний файл Touchstone, или задан вручную в CADFEKO. Опорные импедансы портов будут определены в файле S-параметров. Если параметры задаются вручную в CADFEKO, то можно использовать максимум четыре порта, и для каждого порта должны быть определены опорные импедансы.

Для моделирования транзисторного СВЧ-усилителя, в случае классического крепления транзистора на микрополосковой плате, находящейся в волноводной структуре, применим порты Edge port на ребре. Такие порты создаются между двумя наборами фасок (см. рис. 4). Эти фаски оканчиваются вибраторами, и антенна на входе и выходе

Параметры СВЧ-транзистора N700

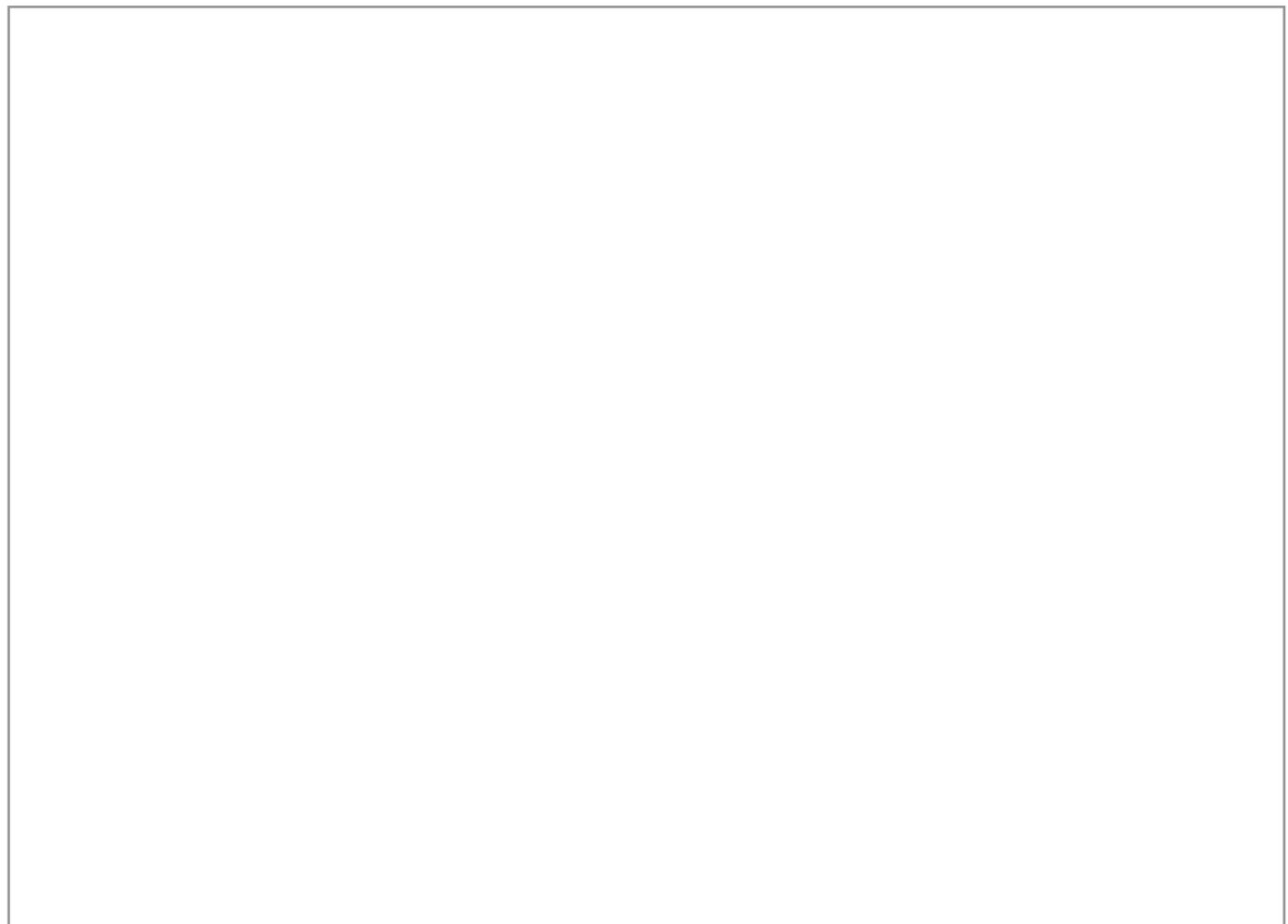
#	S11	S21	S12	S22
1	.964 -20.52	4.820 160.76	.032 78.26	.345 -21.71
2	.961 -26.26	4.502 157.35	.037 73.92	.335 -24.17
3	.933 -38.84	4.324 147.62	.054 67.19	.326 -36.08
4	.896 -50.81	4.114 138.19	.068 61.39	.317 -46.29
5	.859 -62.88	3.880 129.07	.080 55.08	.305 -57.68
6	.826 -74.02	3.641 120.74	.090 50.16	.297 -67.64
7	.794 -84.09	3.403 113.12	.098 45.62	.287 -75.73
8	.768 -93.82	3.176 105.99	.105 41.69	.283 -83.76
9	.768 -93.82	3.176 105.99	.105 41.69	.283 -83.76
10	.747 -102.69	2.958 99.36	.111 38.36	.279 -90.05

ТУ СВЧ могут представлять собой антенны Вивальди.

Антенна Вивальди является широкополосной антенной. Плавное изменение её формы позволяет согласовать входной импеданс транзистора, который может быть порядка единиц ом, и линию с характеристическим импедансом 50 Ом. В области, где щель между проводниками мала по сравнению с длиной волны в свободном пространстве, волны сильно связаны, и когда расстояние между ними увеличивается, взаимодействие становится всё более слабым, и волны излучаются ан-

тенной. Это происходит, когда расстояние между линиями на краю становится больше половины длины волны ($\lambda/2$).

Заметим, что ребро, на котором задётся порт, не обязательно должно быть продолжением согласующей структуры. Микрополосковая линия создаётся на верхней поверхности параллелепипеда, который заполняется диэлектрическим материалом. Нижняя поверхность параллелепипеда объединяется с земляной платой. Боковые стенки этого параллелепипеда удаляются. Граничный порт (см. рис. 4а) создаётся командой *Geometry* → *Create port* → *Edge*



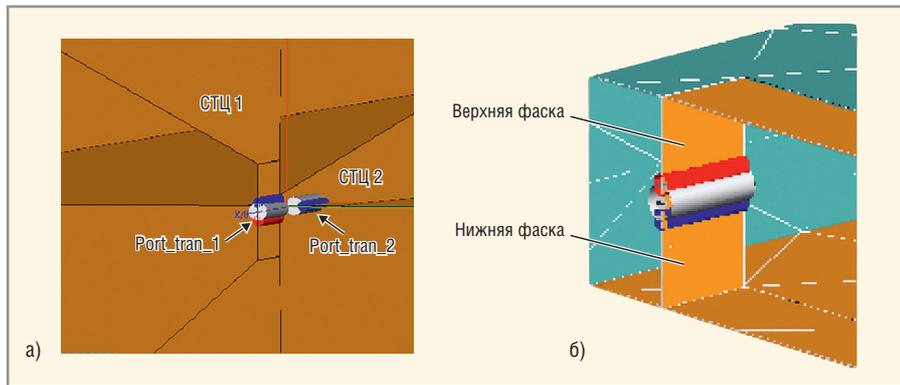


Рис. 4. Порты, между которыми включается активный элемент

а) граничный порт; б) вертикальные фаски

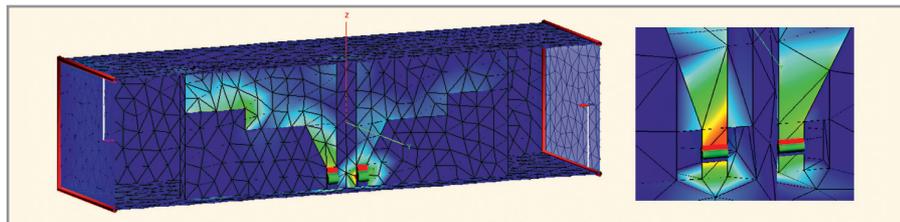


Рис. 5. Волноводный СВЧ-усилитель, в котором транзистор находится на микрополосковой плате



Рис. 6. Частотные характеристики отдельного транзистора и волноводного усилителя, созданном на этом транзисторе



Рис. 7. Коэффициент устойчивости транзистора и волноводного усилителя, реализованного, как показано на рисунке 5

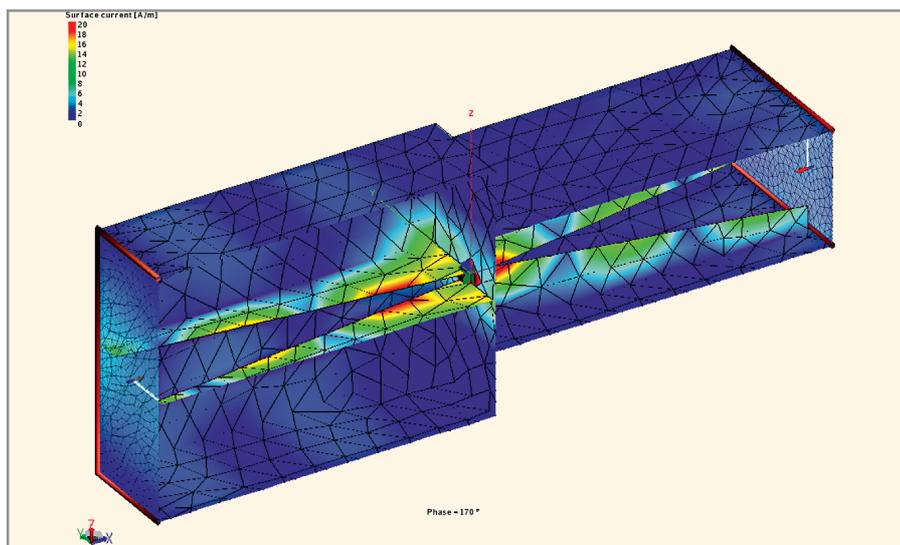


Рис. 8. Волноводный транзисторный СВЧ-усилитель, состоящий из двух повёрнутых волноводов и имеющий дополнительную развязку по поляризации

port. Положительная и отрицательная фаски порта на ребре – это верхняя и нижняя вертикальные фаски, на которые разрезается параллелепипед по се-

редине горизонтальной плоскости (см. рис. 4б).

Пусть ширина линий согласующей структуры, расположенной на подложке

ке толщиной 0,5 мм (диэлектрическая проницаемость 10), равна 1 мм. Выполним расчёт в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц. Аналогичный расчёт транзисторного СВЧ-усилителя продублируем в программе MWO.

Если длину шлейфов выбрать немного меньше длины волны, транзистор будет включен в измерительную линию с характеристическим сопротивлением 50 Ом, и в этом случае можно утверждать, что коэффициент усиления равен $G = |S_{21}|^2$.

Для расчёта электродинамическим способом в программе FEKO чертится вся структура, в которую вставляются активные элементы (см. рис. 5) (в отличие от MWO, где для моделирования отдельных частей согласующей структур – входной СТЦ1 и выходной СТЦ2 – необходимо создавать отдельные экраняющие боксы). Таким образом, связи между согласующими структурами сохраняются.

Устойчивость волноводного СВЧ-усилителя

Очень важным параметром является устойчивость работы ТУ СВЧ в широком диапазоне частот. Устойчивость работы структуры, в которую включен активный элемент (например, транзистор), оценивается инвариантным коэффициентом устойчивости [2]. Этот коэффициент показывает степень пересечения окружности неустойчивой работы с плоскостью диаграммы Смита входного и выходного коэффициента отражения. Известно, что для получения абсолютной устойчивости необходимо, чтобы коэффициент устойчивости был больше 1 во всём рабочем диапазоне частот:

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta_S|^2}{2|S_{21}S_{12}|}, \quad (1)$$

где $\Delta_S = S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12}$.

Расчёт по этой формуле для транзистора, S-параметры которого приведены в таблице, даёт коэффициент устойчивости, меньший 1. Это означает, что должны быть предприняты специальные меры для повышения устойчивости усилителя.

Расчёт коэффициента устойчивости волноводного усилителя, реализованного по схеме (рис. 6), показывает, что в диапазоне от 15 до 17 ГГц коэффициент устойчивости $K \leq -1$, что означает склонность ТУ СВЧ к самовозбуждению (см. рис. 7, расчёт на программе MWO). Кроме того, в экспери-

менте была отмечена высокая чувствительность усиления к напряжению питания.

Таким образом, необходимо использовать развязку входной и выходной согласующей структуры, чтобы повысить устойчивость волноводного транзисторного усилителя.

В реальном усилителе, кроме внутренней обратной связи, действует внешняя обратная связь. Для увеличения коэффициента устойчивости и стабильности усиления можно выполнить оптимизацию конструкции корпуса, его размеров и свойств покрытия. Поворот выходного волновода на 90° (см. рис. 8) значительно уменьшает внешнюю обратную связь за счёт смены поляризации.

Современный подход к проектированию любых СВЧ-конструкций включает оптимизацию. В качестве функции цели в программе FEKO можно задать несколько целевых функций и такие образом выполнить векторную оптимизацию, выбирая весовые коэффициенты этих целевых функций. Кроме того, FEKO вводит новый критерий, который называется «Маска целевой функции», когда можно задать сложную зависимость целевой функции не только в частотном диапазоне, но и в диапазоне других параметров, например, задать требуемую форму диаграммы направленности активной антенны.

Поскольку антенну Вивальди можно построить с различными конфигурациями вибраторов (скачки, экспоненциальный раскрыв), то количество степеней свободы может достигать десяти. В программе FEKO реализовано несколько современных алгоритмов поиска оптимума: метод случайного поиска (роя пчел), генетический алгоритм и симплекс-метод. На рисунке 9 приводятся графики изменения характеристик усилителя (в одной частотной точке) в процессе оптимизации.

В результате постпроцессорной обработки данных с использованием формулы (1) получаем частотную зависимость коэффициента устойчивости, показанную на рисунке 10. Диапазон коэффициента устойчивости от 0 до 1 означает, что усилитель становится потенциально неустойчивым только в том случае, когда он нагружен на импедансы портов, отличные от 50 Ом. Величина $k > 1$ указывает абсолютную устойчивость усилителя [2]. Повыше-



Рис. 9. Оптимизация волноводного СВЧ-усилителя по критерию согласования на входе и выходе и коэффициенту передачи

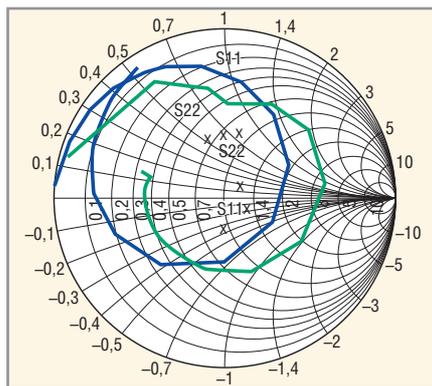


Рис. 11. Частотные зависимости параметров S11 и S22 на диаграмме Смита

ние устойчивости усилителя обычно связано с согласованием.

В заключение приведём также рассчитанные на FEKO комплексные коэффициенты отражения волноводного транзисторного СВЧ-усилителя на входе и выходе. Экспериментальные результаты показаны на рисунках 11 и 12 в виде крестиков. Эксперимент показывает более широкую полосу пропускания, чем расчёт. При каскадировании отдельных каскадов ширина полосы пропускания уменьшается. Можно отметить, что результаты расчёта значительно зависят от поглощения и потерь в реальных металлах и подложках. Нелинейные зависимости от входной мощности и шумовые свойства в рамках данной работы не исследовались.

Выводы

Специализированные программные средства открывают широкие возможности для электродинамического моделирования СВЧ-структур с внедрёнными в них активными элементами (диодами, транзисторами), что показано на примере транзисторного СВЧ-усилителя. Обратные связи между входным и выходным портом в этом случае учитываются автоматически. Такой подход можно считать



Рис. 10. Коэффициент устойчивости волноводного усилителя с поёрнутыми на 90° отрезками волноводов

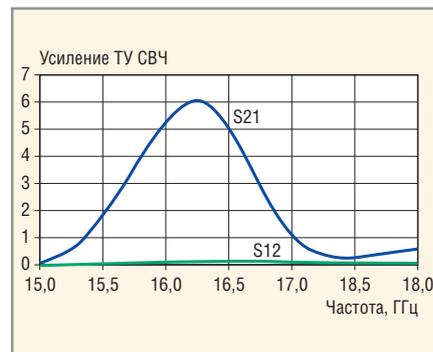


Рис. 12. Частотные характеристики модуля прямой передачи S21 и обратной передачи S12 волноводного транзисторного СВЧ-усилителя

перспективным для проектирования волноводных транзисторных СВЧ-усилителей, активных антенн и активных антенных решеток, а также структур, которые играют роль согласующих и излучающих элементов одновременно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карсон Р. Высокочастотные усилители. Радио и связь, 1981.
2. Шварц Н.З. Транзисторные СВЧ-усилители. Радио и связь, 1980.
3. Раевич В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Раевича. СОЛОН-Пресс, 2003.
4. www.feko.co.za.
5. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет излучающих структур с помощью FEKO. Родник, 2007.
6. Eleftheriades G.V. and Mosig J.R. On the Network Characterization of Planar Passive Circuits Using the Method of Moments. IEEE Trans. MTT. 1996. Vol. 44. No. 3. PP. 438-445.
7. Гунта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ устройств. Радио и связь, 1987.
8. Ченакин А.В., Скачко В.И. Волновод транзисторных усилителей. 5-й Межд. симп. по последним достижениям в технике СВЧ. Киев, 1995. С. 337-340.