

Определение усилительных и шумовых параметров биполярных СВЧ транзисторов по их физическим эквивалентным схемам

Н.А. Васильев, Э.А. Королев, В.Н. Лыпкань, С.А. Раскалинос

Военная академия связи им. С.М. Буденного

Аннотация: В работе осуществлено обоснование физической эквивалентной схемы малосигнальных биполярных транзисторов (БТ) в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) и проведен анализ их усилительных и шумовых свойств с помощью теории линейных активных четырехполюсников. Вследствие громоздкости и непригодности для практических расчетов аналитических выражений, описывающих поведение транзистора в диапазоне частот, расчет полной физической эквивалентной схемы выполнен численным методом с использованием ЭВМ. Разработан алгоритм анализа усилительных и шумовых свойств СВЧ транзистора по известным значениям элементов его физической эквивалентной схемы. Составлена вычислительная программа, реализующая данный алгоритм, которая, с одной стороны, позволяет получить все исходные данные для расчета малошумящих усилителей СВЧ, а с другой – может служить средством повышения эффективности разработки транзисторов и использования их в усилительных схемах.

Ключевые слова: СВЧ, биполярный транзистор, функциональная эквивалентная схема, расчет усилителей

1. Введение

Успехи полупроводниковой электроники последнего десятилетия привели к созданию транзисторов, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн. По результатам испытаний на ударопрочность, вибро - и влагостойкость современные СВЧ транзисторы соответствуют наиболее жестким техническим требованиям, предъявляемым к аппаратуре связи. Эти крайне малогабаритные, надежные и долговечные приборы делают возможным изготовление усилителей с большим коэффициентом усиления, малым уровнем собственных шумов и значительно сниженными по сравнению с другими типами малошумящих усилителей массой и потреблением энергии.

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Для проектирования транзисторных усилителей СВЧ по заданным качественным показателям необходимо знание параметров, применяемых в них элементов. Основные характеристики усилителей в значительной степени определяются параметрами используемых транзисторов. По принципу действия все транзисторы СВЧ делятся на два типа: биполярные и униполярные (полевые). Однако независимо от типа транзистора, его поведение в широком диапазоне частот может быть оценено по физической эквивалентной схеме (ФЭС) или по измеренным параметрам транзистора как четырехполюсника [1]. Преимущество использования ФЭС связано с ее большой информативностью, так как она описывает поведение транзистора в широком частотном диапазоне и при разных режимах работы по постоянному току. Модель транзистора как четырехполюсника менее информативна, но более точна, поскольку при современном уровне измерительной техники внешние параметры транзистора можно измерить точнее, чем значения элементов его эквивалентной

схемы. Поэтому при расчете усилителей в режиме малого сигнала, при котором можно считать, что значения элементов ФЭС не зависят от величины токов и напряжений, приложенных к электродам транзистора, наиболее эффективным является сочетание обоих подходов, когда по относительно не большому объему измеренных параметров рассеяния транзистора уточняются значения элементов его ФЭС методами параметрического синтеза на ЭВМ.

В настоящее время кристаллы крепятся в металлокерамическом держателе (корпусе) с гибкими полосковыми выводами. Влияние корпуса на характеристики транзистора должны быть учтены. Для реализации потенциальных параметров транзисторов используются бескорпусные приборы. Физические процессы в кристалле отображаются сочетанием теоретической модели транзистора (ТМТ) и паразитных элементов кристалла. В зависимости от способа построения теоретической модели различают П- и Т-образные физические эквивалентные схемы СВЧ транзисторов [2].

Для описания малосигнальных СВЧ транзисторов наиболее широко используется Т-образная эквивалентная схема (рис.1). Теоретическая модель на этой схеме обведена пунктиром. Она отражает решение дифференциальных уравнений для процесса дрейфа-диффузии неосновных носителей в базе транзистора [1,3].

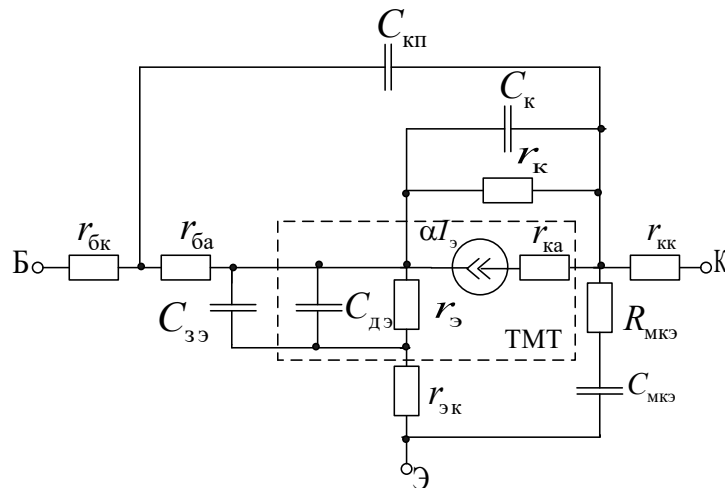


Рисунок 1. Т-образная эквивалентная схема

Модель транзистора как четырехполюсника менее информативна, но более точна, поскольку при современном уровне измерительной техники внешние параметры транзистора можно измерить точнее, чем значения элементов его эквивалентной схемы. Поэтому при расчете усилителей в режиме малого сигнала, при котором можно считать, что значения элементов ФЭС не зависят от величины токов и напряжений, приложенных к электродам транзистора, наиболее эффективным является сочетание обоих подходов, когда по относительно не большому объему измеренных параметров рассеяния транзистора уточняются значения элементов его ФЭС методами параметрического синтеза на ЭВМ.

Физические процессы в кристалле отображаются сочетанием теоретической модели транзистора (ТМТ) и паразитных элементов кристалла.

Объединяя схему замещения кристалла и корпуса, получим полную физическую эквивалентную схему малосигнального биполярного транзистора СВЧ, представленную на рис.2.

Расчет усилительных параметров полной ФЭС наиболее просто проводится методом поэлементного наращивания, так как она состоит из простейших соединений элементов и исходного четырехполюсника, описывающего теоретическую модуль

транзистора. Для этого необходимо определить Z -параметры теоретической модели биполярного транзистора и учесть влияние остальных элементов [1,4].

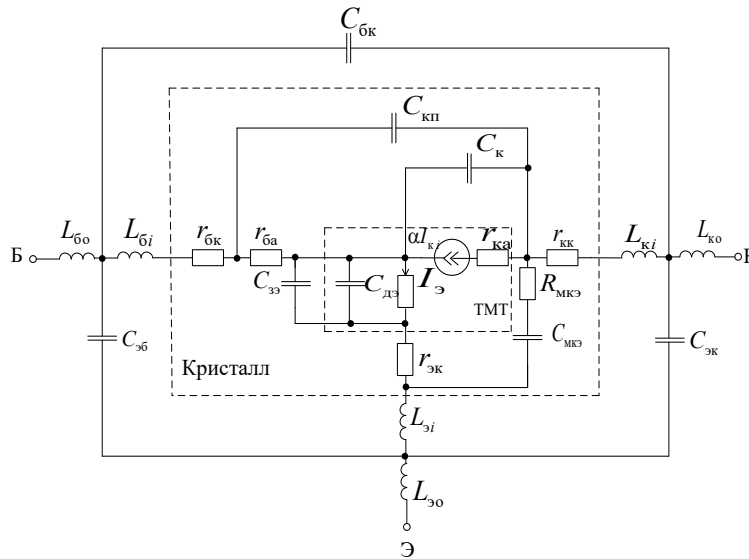


Рисунок 2. Схема малосигнального биполярного транзистора СВЧ

Результирующая шумовая схема биполярного транзистора представляется аналогично полевому транзистору с барьером Шоттки в виде четырехполюсника с шумовыми источниками на входе. Для нее определяется матрица спектральных плотностей шумовых источников. С использованием этой матрицы вычисляются первичные шумовые параметры БТ и рассчитывается коэффициент шума [5].

Для определения усилительных и шумовых параметров биполярных СВЧ транзисторов по их физическим эквивалентным схемам предлагается использовать программу. Она предназначена для определения усилительных и шумовых параметров малосигнальной модели БТ, расчета его коэффициентов усиления и шума в заданном диапазоне частот. С целью отладки и демонстрации работы в программу введены данные для СВЧ-транзистора (рис. 3.).

Алгоритм анализа заключается в вычислении Y -параметров и первичных шумовых параметров ТМТ БТ. Для определения характеристик полной ФЭС используется метод поэлементного наращивания схем [5].

Результаты решения задачи сведены в таблицу 1, построены графики зависимостей $K_p(f)$ и $K_u(f)$ которые приведены на рис. 4.

Таблица 1

Частота f , ГГц	Максимальный коэффициент	Минимальный коэффициент
	усиления $K_p, \text{дБ}$	шума $K_u, \text{дБ}$
2,00	11,33	1,29
3,00	9,25	1,50
4,00	7,73	1,73
5,00	6,55	1,97
6,00	5,58	2,23
7,00	4,78	2,48
8,00	4,10	2,73

```

Y-ПАРАМЕТРЫ
YR[1]=0.00102483531279121 YJ[1]=0.0202797464639873
YR[2]=-0.000181091089438865 YJ[2]=-0.00556720262337551
YR[3]=0.0187967458934857 YJ[3]=-0.0159350089592798
YR[4]=0.00284090256066573 YJ[4]=0.0110078841417169
Шумовые параметры
AIR[1]=-0.0177561441536776 AIJ[1]=0
AIR[2]=0.0989313135759969 AIJ[2]=-0.0631460815158736
AIR[3]=0.0989313135759969 AIJ[3]=0.0631460815158736
AIR[4]=0.0373506803690317 AIJ[4]=0
EIR=[1]=0.189301080619294 EIJ[1]=0
EIR=[2]=-1.34225706970601 EIJ[2]=5.79813909134317
EIR=[3]=-1.34225706970601 EIJ[3]=-5.79813909134317
EIR=[4]=61.5087067668399 EIJ[4]=0
GCH=0.189301080619294
RCH=61.5087067668399
GM1=-0.393360598011462
GM2=-1.69919720432088
FN=не число
YOR=не число YOJ=-0.094265338943348
5 6.48006108925032 не число

```

Рисунок 3. Выходные параметры в программе «Анализ ФЭС БТ»

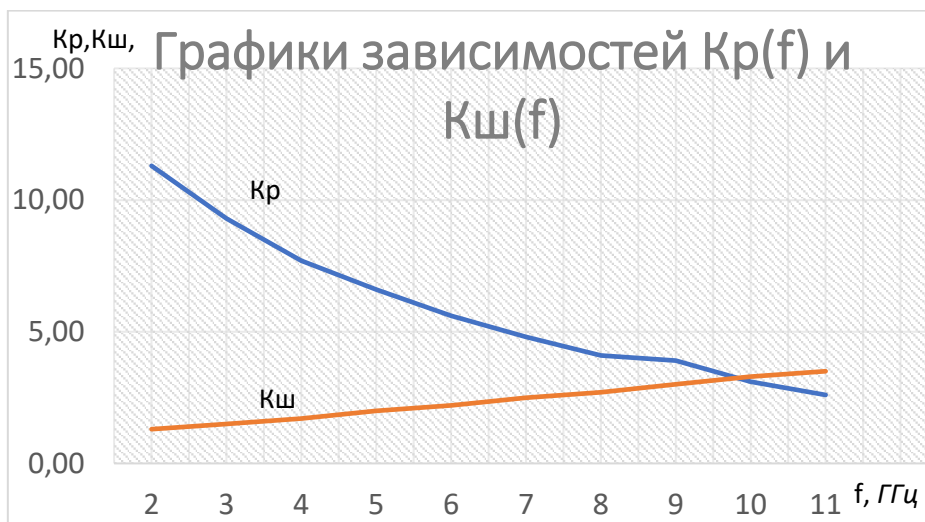


Рисунок 4. Результаты анализа в программе «Анализ ФЭС БТ»

3. Заключение

Для расчета усилителей на низких частотах используется статические характеристики и дифференциальные параметры транзисторов.

При расчете усилителей на высоких и сверхвысоких частотах целесообразно использовать внешние параметры, которые получают путем измерений или рассчитывают по ФЭС СВЧ транзисторов. При анализе шумовых свойств БТ составляющая его эквивалентная шумовая схема, состоящая из двух частей: внутренней и внешней. Внутренняя часть транзистора является его идеализированной теоретической моделью, шумовых свойства которой обусловлены суммарным действием всех шумовых источников. Результат действия отображается двумя взаимно-коррелированными источниками шумового тока, включенными на входе и выходе ТМТ.

Во внешней части ФЭС отображаются шумовые генераторы, учитывающие тепловыми шумы. Для удобства анализ ФЭС СВЧ БТ представляется в виде собственно транзистора (теоретической модели) и элементов, учитывающих влияние внешних областей полупроводниковой пластины и элементов корпуса. Аналитические выражения, описывающие физические процессы в теоретической модели БТ, сравнительно просты и легко поддаются анализу. Аналитические выражения для определения внешних параметров ФЭС БТ громоздки и неприменимы для анализа. По этой причине анализ полной ФЭС СВЧ БТ возможно выполнить только численным методом с использованием ЭВМ.

Список литературы

1. Лыпкань В.Н., Текшев В.Б. Автоматизированное проектирование малошумящих транзисторных усилителей СВЧ. – С-Петербург: СПВВИУС, 1992. – 230с.
2. Шварц Н.З. Усилители СВЧ на полевых транзисторах. – М.: Радио связь, 1987. – 173с.
3. Петров Г.В., Толстой А.И. Линейные балансные СВЧ усилители. – М.: Радио связь, 1983. – 176 с.
4. Данилин В.Н., Кушниренко А.И., Петров Г.В. Аналоговые полупроводниковые интегральные схемы СВЧ. – М.: Радио и связь, 1985. – 192 с.
5. Н.А. Васильев, В.Ю. Лобазов, В.Н. Лыпкань Анализ физической эквивалентной схемы полевого транзистора с барьером Шоттки в диапазоне сверхвысоких частот. Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019.–С. 401-408.