

На правах рукописи

Хусейн Салих Ахмед Салана

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ
ПРИ КОНТРОЛЕ ПРОЦЕССА ИХ ПРОИЗВОДСТВА

05.13.07 - автоматизация технологических
процессов и производств

05.13.05 - элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Харьков -1994

AB 29.471

Работа выполнена на кафедре "Вычислительная техника и программирование" Харьковского политехнического института.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Васильев Виктор Георгиевич

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Иванов Михаил Анатольевич
- кандидат технических наук,
Серков Александр Анатольевич

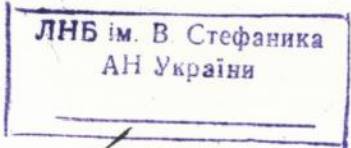
Ведущая организация - ГНПО Метрология (г. Харьков)

Защита состоится 1994 г.

в - часов на заседании специализированного совета
Д 068.39.02 в Харьковском политехническом институте по адресу
310002 г. Харьков-2, МСП, ул. Фрунзе, 21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского политехнического института.

Автореферат разослан 18 марта -1994 г.



Ученый секретарь
специализированного совета

Кизилев В. У.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00801588 (U)

АВ - 29, А 71

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Совершенствование процесса производства полупроводниковых СВЧ приборов возможно лишь при осуществлении всестороннего контроля технологического процесса их изготовления. В настоящее время в достаточной степени осуществлен лишь контроль механических и некоторых электрических параметров этих полупроводниковых приборов. Однако опыт показывает, что контроль только перечисленных выше параметров не обеспечивает одинаковости изготовления и, следовательно, идентичности характеристик этих приборов. В настоящее время получило распространение измерение, так называемых, S-параметров этих приборов. Однако измеренные значения S-параметров не позволяют однозначно оценить работоспособность контролируемого прибора, так как такая оценка возможна лишь тогда, когда известны отклонения параметров эквивалентной схемы от заданных значений. По этой причине возникает задача определения значений параметров эквивалентной схемы по результатам измерения S-параметров полупроводниковых приборов. Эта задача в диссертационной работе решена применительно к полевым транзисторам с барьером Шотки (ПТШ).

Решение задачи идентификации параметров позволяет автоматизировать контроль технологического процесса и уменьшить брак при изготовлении таких, широко используемых в СВЧ технике, приборов как ПТШ.

Цель работы. Разработка метода идентификации параметров эквивалентной схемы замещения ПТШ на основании измерения значений S-параметров ПТШ при различных значениях частоты, позволяющая автоматизировать расчет отклонений параметров от номинальных значений.

Научную новизну имеют положения, выносимые на защиту:

1. Разработан новый метод идентификации параметров нелинейной динамической системы, каковой является эквивалентная схема замещения ПТШ.
2. Предложен численный метод расчета параметров волновой матрицы рассеяния (S-параметров) нелинейной эквивалентной схемы замещения ПТШ.

3. Предложен метод построения нелинейной регрессионной модели ПТШ.

Практическая ценность работы заключается в разработке алгоритмического и программного обеспечения для реализации предложенных методик. Использование предложенных программ решает задачи оценки работоспособности ПТШ, упрощает и ускоряет отладку схем, содержащих ПТШ. Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение может быть использовано также для решения аналогичных задач, связанных с идентификацией параметров нелинейных объектов.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы использованы при выполнении госбюджетных и хоздоговорных работ лаборатории электронного моделирования кафедры ВПП Харьковского политехнического института.

Апробация работы. Основные научные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на республиканской научно-технической конференции "Функционально-ориентированные вычислительные системы" (Харьков, 1990), на международном научно-техническом семинаре "Теория идентификации нелинейных динамических объектов и перспективы развития" (Ченстохов, Польша, 1991), на республиканской научно-технической конференции "Проблемы автоматизированного моделирования в электронике" (Киев, февраль, 1992), на международной научно-технической конференции "Micro CAD System" (Харьков, июнь 1993), на международной научно-технической конференции "Функционально-ориентированные вычислительные системы" (Алушта, октябрь 1993).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 работ, перечисленных в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Общий объем диссертации 142 стр., в том числе 69 стр. основного текста, 10 стр. списка литературы (100 наименований), 43 стр. приложений. Диссертация содержит 17 рисунков, 46 таблиц.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлена краткая аннотация содер-

жания и основные результаты работы.

Первая глава диссертации содержит краткое описание принципа работы ПТШ и виды контроля технологического процесса при изготовлении ПТШ. Обосновывается необходимость контроля параметров эквивалентной схемы замещения на основании измерения волновой матрицы рассеяния (S -параметров) ПТШ. Описываются устройства для измерения S -параметров. Формулируются основные задачи исследования, связанные с выбором соответствующей эквивалентной схемы замещения и составлением ее математической модели, нахождением метода расчета S -параметров для эквивалентной схемы замещения, исследованием математической модели для выработки метода идентификации, определением погрешностей разработанного метода и сравнением их с погрешностями традиционных методов.

Во второй главе дается вывод уравнений четырехполосника и производится преобразование этих уравнений при работе на СВЧ. Производится расчет параметров волновой матрицы рассеяния и определяется связь между значениями этих параметров, характеристиками входных сигналов и параметрами четырехполосника при прямом и обратном включении. Осуществляется нормирование уравнений четырехполосника и предлагаются аналитические выражения для расчета нормированных параметров волновой матрицы рассеяния (S -параметры).

В третьей главе на основании анализа литературы, посвященной описанию процессов в полупроводниковых структурах, производится выбор модели, описывающей процессы в ПТШ. В результате сравнения различных эквивалентных схем замещения, выбирается схема, приведенная на рис. 1.

Учет нелинейности параметров этой схемы записывается в виде :

$$C_2 = C_{20} + C_{21} u_{C2} + C_{22} u_{C2}^2 ;$$

$$S = S_0 + S_1 u_{C2} + S_2 u_{C2}^2 ;$$

$$g = g_0 + g_1 u_{C3} + g_2 u_{C3}^2 .$$

где S - крутизна характеристики источника тока i_r (рис. 1).

Такая схема позволяет моделировать процессы, происходящие в ПТШ в широком диапазоне частот от 2 до 20 ГГц.

Эквивалентная схема ПТШ.

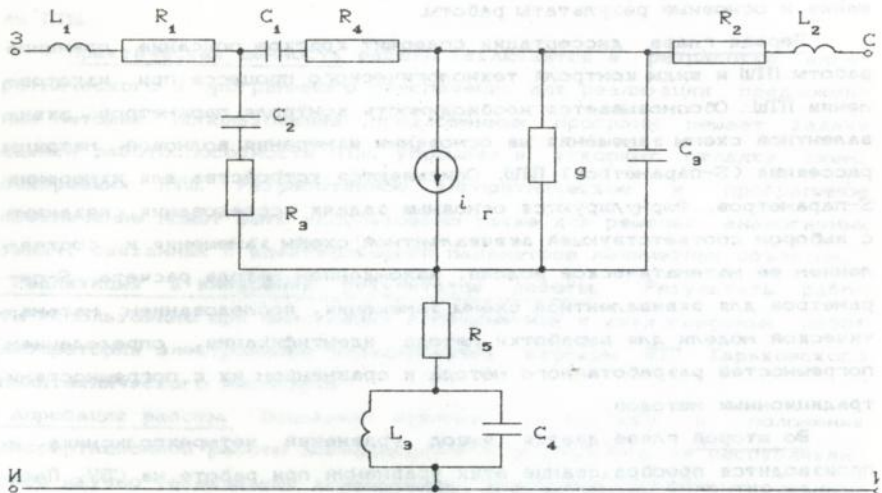


Рис. 1.

На основании выбранной схемы замещения составлены системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в ПТШ.

Для полученных дифференциальных уравнений находится периодическое решение с использованием метода гармонической линеаризации при учете первой гармоники сигналов в систем.

В итоге проделанной работы получена программа, позволяющая находить периодические решения для эквивалентной схемы (рис. 1) при прямом и обратном включении и, следовательно, рассчитывать S-параметры этой схемы при заданном значении частоты и амплитуды входных сигналов.

Для решения обратной задачи, т.е. определения параметров схемы замещения по заданным частотным характеристикам S-параметров была составлена линейная регрессионная модель и применен один из традиционных методов решения обратных задач - метод сингулярного разложения. В работе показано, что такой метод решения позволяет получить приемлемые результаты только при малых отклонениях параметров схемы замещения от их номинальных значений. При больших отклонениях параметров от их номинальных значений использование

линейной регрессионной модели не позволяет находить правильное решение, так как функция погрешности имеет множество локальных минимумов, вследствие низкой чувствительности этой функции к изменению некоторых параметров эквивалентной схемы ПТШ. В связи с вышеизложенным делается вывод о необходимости составления нелинейной регрессионной модели и применении методов решения обратных задач для нелинейных моделей, которые разработаны гораздо хуже, чем методы, используемые для линейных задач.

Таким образом, возникает необходимость разработки метода идентификации параметров этой модели.

Для построения нелинейной регрессионной модели возможно использование метода группового учета аргументов (МГУА), однако применение этого метода приводит к необходимости перебора огромного числа комбинаций параметров, что делает такое решение крайне проблематичным. Применение сингулярного разложения из-за огромных размеров матрицы плана также практически неосуществимо. По этой причине делается вывод о возможности использования метода ортогонального проектирования, позволяющего последовательно усложнять модель до получения требуемой точности моделирования.

В четвертой главе разрабатывается нелинейная регрессионная модель ПТШ и метод идентификации параметров этой модели. Отклонения S-параметров

$$S_{ij}(\omega) = \rho_{ij}(\omega) e^{j\varphi_{ij}(\omega)}$$

ищутся с помощью нелинейной комбинации отклонений параметров Δx , в виде рядов Колмогорова - Габора

$$\Delta \rho_{ij}(\omega) = \sum_{K=1}^N a_K^{(\omega)} \Delta x_K + \sum_{L=1}^N \sum_{K=1}^N a_{KL}^{(\omega)} \Delta x_K \Delta x_L;$$

$$\Delta \varphi_{ij}(\omega) = \sum_{K=1}^N b_K^{(\omega)} \Delta x_K + \sum_{L=1}^N \sum_{K=1}^N b_{KL}^{(\omega)} \Delta x_K \Delta x_L.$$

Приведенные выше уравнения могут быть представлены в матричной форме при заданном ω :

$$\begin{vmatrix} \Delta x_{11} & \dots & \Delta x_{n1} & \Delta x_{11}^2 & \dots & \Delta x_{11} & \Delta x_{21} & \dots & \Delta x_{11}^3 & \dots \\ \Delta x_{1k} & \dots & \Delta x_{nk} & \Delta x_{1k}^2 & \dots & \Delta x_{1k} & \Delta x_{2k} & \dots & \Delta x_{1k}^3 & \dots \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \Delta \rho_{lj} \\ \vdots \\ \Delta \rho_{lj} \end{vmatrix} \cdot L$$

$$X \bar{a} = \bar{\rho}$$

где X - матрица приращений, \bar{a} - вектор коэффициентов при заданном ω , $\bar{\rho}$ - вектор приращений $\Delta \rho$.

Аналогично, для вектора приращения $\bar{\rho}$ получим:

$$X \bar{b} = \bar{\rho}$$

Приведенные уравнения задают некоторое линейное пространство с базисными векторами

$$x = \{ \{ x_1, x_2, \dots, x_n \} \}$$

Матрица проектирования P на рассматриваемое пространство имеет вид:

$$P = x (x^T x)^{-1} x^T$$

Используя модификацию метода ортогонализации Грама - Шмидта можно найти проекции $\bar{\rho}$ на \bar{x}_k и выделить среди них наиболее существенные.

В результате анализа установлено, что каждый из S -параметров зависит, в основном, от ограниченного числа параметров эквивалентной схемы. Вычисляя среднеквадратичную погрешность на каждом шаге можно найти такое количество компонент пространства X , которое обеспечивает заданную точность моделирования.

Так, например, в табл. 1 приведены результаты моделирования зависимости S_{11} от параметров схемы замещения и дана относительная среднеквадратичная погрешность моделирования ϵ^2 .

Таблица 1

Результат моделирования ПТШ по модулю параметра $S_{11}(\rho_{11})$ на частоте 2 ГГц

N модели	Базис модели	ε, %
1	$1,55X_1^2 X_7$	54,1
2	$2,46X_7 X_{11} + 1,55X_1^2 X_7$	29,85
3	$-0,89X_8 + 2,46X_7 X_{11} + 1,55X_1^2 X_7$	24,1
4	$3,88X_1 X_{11} - 0,89X_8 + 2,46X_7 X_{11} + 1,55X_1^2 X_7$	17,92
5	$0,36X_1^2 X_8 + \dots + 1,55X_1^2 X_7$	14,01
6	$-1,7X_7^2 X_8 + \dots + 1,55X_1^2 X_7$	12,46
7	$-1,15X_8 X_{11} - \dots + 1,55X_1^2 X_7$	10,8
8	$-0,98X_7 X_8 - \dots + 1,55X_1^2 X_7$	9,165
9	$1,36X_8^2 X_7 - \dots + 1,55X_1^2 X_7$	8,303
10	$0,26X_8^3 + \dots + 1,55X_1^2 X_7$	7,97
11	$0,296X_{11}^2 X_1 + \dots + 1,55X_1^2 X_7$	7,71
12	$-2,10X_1^2 X_{11} + \dots + 1,55X_1^2 X_7$	7,27
13	$-0,44X_{11}^3 - \dots + 1,55X_1^2 X_7$	6,97
14	$3,69X_{11} - \dots + 1,55X_1^2 X_7$	6,64
15	$0,33X_{11}^2 X_1 + \dots + 1,55X_1^2 X_7$	5,11
16	$0,73X_1^2 + \dots + 1,55X_1^2 X_7$	4,89
17	$-0,08X_8^2 X_{11} + \dots + 1,55X_1^2 X_7$	4,51
18	$-0,39X_1 X_8 - \dots + 1,55X_1^2 X_7$	4,41
19	$-1,72X_7 - \dots + 1,55X_1^2 X_7$	4,36
20	$-0,33X_1^3 - \dots + 1,55X_1^2 X_7$	4,2
21	$-0,37X_7^3 - \dots + 1,55X_1^2 X_7$	3,96
22	$-3,81X_1 X_7 - \dots + 1,55X_1^2 X_7$	3,82
23	$1,26X_1 - \dots + 1,55X_1^2 X_7$	3,79
24	$0,81X_7^2 + \dots + 1,55X_1^2 X_7$	3,766

В пятой главе на основании проделанных расчетов найдены функциональные зависимости, определяющие связь между S-параметрами (ρ_{ij}, φ_{ij}) и параметрами эквивалентной схемы для различных частот в виде:

$$S_{ij} = f(x_m, x_k, \dots, x_L).$$

Указанные выше характеристики определялись для частот, лежащих в пределах от 2 до 20 ГГц.

Таким образом, полученные зависимости позволили представить модель ПТШ в виде 4^{-x} матриц, описывающих связь между параметрами схемы: замещения 4^{-x} S-параметров в следующей матричной форме (например для параметра S_{11}):

$$\begin{pmatrix} a_1(\omega_1) & a_2(\omega_1) & \dots & a_{m_1}(\omega_1) \\ b_1(\omega_1) & b_2(\omega_1) & \dots & b_{m_1}(\omega_1) \\ a_1(\omega_n) & a_2(\omega_n) & \dots & a_{m_1}(\omega_n) \\ b_1(\omega_n) & b_2(\omega_n) & \dots & b_{m_1}(\omega_n) \end{pmatrix} \times |X| = \begin{pmatrix} \rho_{11}(\omega_1) \\ \varphi_{11}(\omega_1) \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \rho_{11}(\omega_n) \\ \varphi_{11}(\omega_n) \end{pmatrix}$$

где $X \in \left\{ \begin{matrix} x_1^2 x_7, & x_7 x_{11}, & x_8, & x_1 x_{11}, & x_1^2 x_8, & x_7^2 x_8, & x_8 x_{11}, & x_7 x_8, & x_8^2 x_7, \\ x_8^3, & x_{11}^2 x_8, & x_1^2 x_{11}, & x_{11}^3, & x_{11}, & x_{11}^2 x_1, & x_1^2, & x_8^2 x_{11}, \\ x_1 x_8, & x_7, & x_1^3, & x_7^3, & x_1 x_7, & x_1, & x_7^2 \end{matrix} \right\}$

Решение вышеприведенного матричного уравнения позволяет найти отклонения параметров ПТШ от номинальных значений. Особенность решения рассматриваемого матричного уравнения заключается в том, что компоненты вектора X не являются независимыми. В связи с этим для

решения уравнений была произведена модификация метода ортогонального проектирования. На первом этапе счета при помощи ортогонального проектирования определялось первое приближение компонент вектора X , на втором этапе счета методом поразрядного приближения уточнялись значения этих компонент с учетом их взаимной зависимости. Для реализации этого расчета разработаны соответствующие алгоритмические и программные средства.

Для оценки погрешности идентификации один из идентифицируемых параметров изменялся непрерывно в пределах от $-0,8_{\text{хн}}$ до $+3_{\text{хн}}$ при этом остальные параметры задавались на своих предельных значениях ($-0,8_{\text{хн}}$ или $3_{\text{хн}}$). Погрешность идентификации при таком вычислительном эксперименте составляла (как это следует из прилагаемых в работе таблиц) не более 10-15%. Проводилась также проверка работоспособности метода при учете погрешности измерения S -параметров. Результаты расчетов показывают, что при введении ошибки измерения, распределенной по нормальному закону со стандартным отклонением $\sigma=0,05_{\text{хн}}$, погрешность идентификации не превышает 20-25%.

В заключении подводятся итоги проделанной работы и формулируются основные ее результаты.

В приложениях приводятся разработанные программные средства и даются результаты расчета параметров модели ПТШ.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод идентификации параметров эквивалентной схемы ПТШ по результатам измерения частотных характеристик волновой матрицы рассеяния (S -параметров) для автоматизации контроля качества в процессе производства.

2. Предложен метод расчета S -параметров ПТШ по нелинейной эквивалентной схеме занесения на основе гармонической линеаризации ряда нелинейных зависимостей.

3. Разработан метод построения нелинейной регрессионной модели ПТШ с учетом значимости параметров его эквивалентной схемы.

4. Разработан метод идентификации параметров нелинейной модели ПТШ на основе ортогонального проектирования и поразрядного приближения.

5. Проведена оценка эффективности идентификации параметров ПТШ, подтвердившая надежность и точность полученных результатов.

Основные положения диссертационной работы нашли отражение в публикациях:

1. Васильев В. Г., Гридчин С. И., Салама Хусейн. Исследование динамики элементарного звена систем с распределенными параметрами. // Вестник ХПИ, 1990, N 278. С. 58-60.

2. Васильев В. Г., Гридчин С. И., Салама Хусейн. Построение алгоритма функционирования ФОВС для идентификации нелинейных объектов. // Тез. докладов республиканской научно-технической конференции, 4-6 октября 1990. Часть I. Теория и программные средства. Харьков: ХПИ, 1990. С. 51-52.

3. Васильев В. Г., Гридчин С. И., Салама Хусейн. Модели для идентификации полупроводниковых структур. // Тез. докладов научно-технического семинара. г. Ченстохов. Польша. 1991. с. 22-26.

4. Васильев В. Г., Гридчин С. И., Салама Хусейн. Адаптивные модели для идентификации полупроводниковых структур. // Тез. докладов республиканской научно-технической конференции. 2-4 февраля 1993. г. Киев. с. 36-37.

5. Васильев В. Г., Гридчин С. И., Салама Хусейн. Компьютерные методы идентификации полупроводниковых структур. // Тез. докладов международной научно-технической конференции. Октябрь 1993. г. Харьков. с. 19.



ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Подписано в печать 14.03.94. Формат 60x84/16. Офсетная печать.
Усл.п.л. 1,0. Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 100. Заказ №63.

Харьков-108, ротاپронт ННЦ ХФТИ

461981

AB 29.471

AB 29.471