

# 用模拟退火算法从 $S$ 参数提取 HFET 小信号等效电路模型参数

陈俊 刘训春

(中国科学院微电子研究和发展中心, 北京 100029)

**摘要:** 微波集成电路和微波器件的设计需要准确地提取 HFET 的小信号等效电路模型参数。采用带回火的模拟退火算法从  $S$  参数提取 HFET 小信号等效电路模型参数, 得到了高质量的解。计算结果是全局最优解, 摆脱了初始值的影响, 并且克服了局部优化算法遇到的不收敛或收敛到错误解的问题。利用测量得到的栅电阻, 计算结果的精度可以进一步提高。这个算法同样也适用于 HBT、电容和电感等器件模型参数的提取。

**关键词:** 参数提取; 模拟退火算法; HFET;  $S$  参数; 小信号等效电路

**EEACC:** 1350F; 2560B; 2560S

中图分类号: TN 402 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2001)01-0079-04

## 1 引言

由于可以制造出截止频率和最高振荡频率高达几百 GHz 的 HFET, 因此它在微波和毫米波集成电路以及高速集成电路中得到广泛的应用。在这些集成电路的设计中, 精确的 HFET 器件模型是保证电路设计成功的关键。目前大多数微波集成电路 CAD 设计软件, 如 Microwave Office<sup>TM</sup>、HP Advanced Design System<sup>TM</sup>, 都包含有 HFET 小信号等效电路模型。一个典型的具有 13 个元件的小信号等效电路模型如图 1 所示。

HFET 的小信号等效电路模型主要用于微波线性电路的设计, 尤其是前级放大器的设计。HFET 非线性模型的建立常常也需要确定不同偏压条件下的小信号等效电路参数。另一方面, 由于绝大多数小信号等效电路模型参数与器件的结构和制作工艺有密切的关系, 因此, 准确地获取小信号等效电路参数对于验证器件设计、优化工艺条件也是大有帮助的。

直接从材料特性、工艺条件和器件工作状态精确确定模型参数很困难, 因此通过实验测量来获得模型参数是比较实用的方法。HFET 的电学性能测

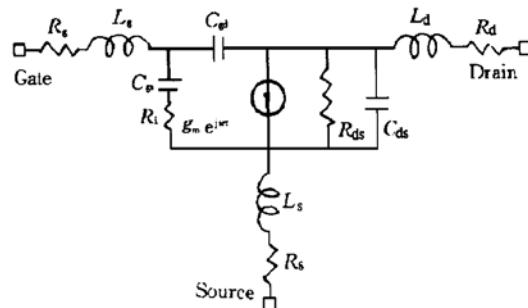


图 1 13 个元件的 HFET 的小信号等效电路模型

FIG. 1 Small Signal Equivalent Circuit for HFET

量包括直流特性测量和微波  $S$  参数测量。直流特性测量只能得到 HFET 的电阻、跨导参数<sup>[1]</sup>, 而电容、电感等参数不能通过简单的测量手段获得。另外, 直流工作条件下的跨导值并不等于在 RF 工作条件下的值。因此, 实际工作中确定 HFET 小信号等效电路模型参数用的还是从  $S$  参数提取的方法。

已经报道的从  $S$  参数提取小信号等效电路的方法大致可以分为两类。一类是解析公式直接提取的方法<sup>[2]</sup>; 另一类是基于优化数据拟合的方法。直接提取的方法费时少, 可以得到确定、惟一的解。但是

陈俊 1973 年出生, 博士生, 研究兴趣是化合物半导体器件和微波单片集成电路。

刘训春 1943 年出生, 研究员, 研究兴趣是化合物半导体器件和高密度等离子体刻蚀技术。

1999-08-04 收到, 1999-10-27 定稿

©2001 中国电子学会

它容易受到测量精度以及等效电路模型准确性的影晌. 而且由于直接提取的方法仅使用一个或几个频率点, 因此不能保证在全部频率范围内模型参数的一致性. 要改善在全部频率范围内的表现, 还是需要一个额外的优化过程.

基于优化的方法受测量误差的影响较小, 可以得到比直接提取的方法更为准确的参数值. 但是目前发表的优化过程大部分采用的是局部优化算法, 得到的解依赖于初始值的选取, 有时还会得到不符合实际和离真实值相差较大的错误解. 针对这个问题, Kondoh 最近提出一种改进的优化算法<sup>[3]</sup>, 减弱了优化结果对初始值的依赖性. 经过 Van Niekerk 等人的改进<sup>[4,5]</sup>, 这个算法具有了更好的适应性, 但是仍有约 10% 的结果不收敛或收敛于错误的解. 事实上, 由于这个改进的算法仍然是局部优化算法, 因此很难彻底消除错误解的情况.

如果采用模拟退火算法、神经网络、遗传算法这些全局优化算法, 错误解的问题自然就避免了. 本文提出一种用模拟退火算法从 S 参数提取 HEMT 小信号等效电路参数的方法. 由于模拟退火算法是一种全局优化算法, 因此初始值的选取不再对最终解产生影响. 并且, 最终解是全局最优的.

## 2 算法实现

Kirkpatrick 根据固体退火过程和组合优化问题之间的类似性, 在 1982 年把固体退火模拟中的 Metropolis 准则引入到优化过程, 取得了显著的成果. 经过十几年的发展, 模拟退火算法研究不断深入, 出现了带记忆功能、回火功能、返回搜索以及多次寻优等改进形式.

模拟退火算法在本质上与局部搜索算法. 局部搜索算法的接受准则使算法进程方向单驱直入, 即从初始解开始, 沿逐次更优的方向移动直到停止准则限定的某个最优解. 除进程方向将初始解引到整体最优解的特殊情况外, 最终解的质量与初始解的质量有很大的关系. 而在模拟退火算法中, Metropolis 接受准则引入了新的随机因素, 使算法进程方向呈现跳跃性, 有可能跳离局部最优的“陷阱”. 因此最终解对初始解的依赖性减弱了, 并且最终解的质量趋于稳定. 从这个角度看, 模拟退火算法是一种全局优化算法.

尽管模拟退火算法提出时用于解组合优化问

题, 这个算法也可以用于处理连续优化的问题. 针对 HFET 小信号等效电路模型参数提取问题, 我们采用了带有记忆功能和回火退火功能的模拟退火算法. 算法的方框图如图 2 所示.

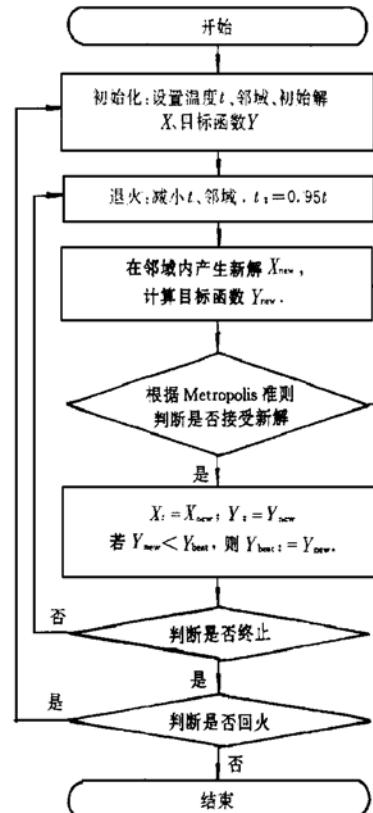


图 2 模拟退火算法提取 HFET 参数方框图

FIG. 2 Flow chart for Extracting Parameters of HFET Using Simulated Annealing Algorithm

算法中目标函数由以下公式计算.

$$\sum_{\text{所有频率点}} \left[ \left| \frac{S_{11m} - S_{11s}}{S_{11m}} \right|^2 + \left| \frac{S_{12m} - S_{12s}}{S_{12m}} \right|^2 \right. \\ \left. + \left| \frac{S_{21m} - S_{21s}}{S_{21m}} \right|^2 + \left| \frac{S_{22m} - S_{22s}}{S_{22m}} \right|^2 \right]$$

式中  $S_{ijm}$  和  $S_{ijs}$  ( $i, j \in \{1, 2\}$ ) 分别是 HFET 的实际测量和模型模拟的 S 参数. 计算 HFET 小信号等效电路模型的 S 参数, 首先用不定导纳矩阵法计算出小信号等效电路的各频率点的 Y 参数<sup>[6]</sup>, 再换算到 S 参数<sup>[7]</sup>.

回火退火算法的引入使得最终解的质量得以保证. 当退火温度 T 衰减到较小时, 接受率会相应减小, 同时邻域空间也随之缩小. 此时, 优化过程要跳出当前局部最优“陷阱”就比较困难了. 增加一个回

火处理之后,  $T$  值变大, 邻域也相应扩大, 使算法可以“穿过”分隔各个“陷阱”的“高壁”以达到更深的“阱”. 实验中, 经过一到两次回火退火就可以到达全局最优解附近.

### 3 算法性能检验与分析

我们通过两组实验来分别检验提取结果的准确度和测量数据误差对提取结果的影响. 我们采用了模拟测量数据来代替测量的 S 参数. 模拟测量数据是由 Eclipse 4.02 Demo<sup>TM</sup> 生成的 1—40GHz 内均匀分布的 40 个频率点的 S 参数. 每一次实验初始值都在取值范围内随机生成, 结果没有不收敛或收敛

到错误解的情况发生. 真实的模型参数和提取的模型参数对照情况列于表 1.

#### 3.1 从理想的模拟测量数据提取模型参数来检验算法的准确度

为了评价模拟退火算法提取参数数值的准确度, 一共进行了 50 次从模拟测量数据提取模型参数的实验. 通常使用的是 HP8510C 网络分析仪获得 HFET 的 S 参数. HP8510C 可以给出小数点后 6 位数字的结果. 实验中模拟测量数据有 5—6 位有效数字, 和真实的测量数据差别不大. 实际提取实验中, 目标函数值都能达到  $3 \times 10^{-6}$  以下.

表 1 模拟测量数据提取的参数值的平均值和标准方差

Table 1 Average Value and Standard Difference of Parameters Extracting from Simulated Measurement Data

单位	真实值	1 从模拟测量数据提取的结果		2 噪声化模拟测量数据后提取的结果	
		平均值	标准方差	平均值	标准方差
$\tau$	ps	5.0000	5.0160	0.0103	5.0112
$C_{ds}$	pF	0.1000	0.10003	0.00007	0.10015
$L_g$	nH	0.1800	0.17975	0.00016	0.17964
$C_{gs}$	pF	0.2800	0.28116	0.00073	0.28055
$G_m$	mS	24.500	24.589	0.059	24.661
$L_d$	nH	0.1500	0.15007	0.00015	0.14998
$L_s$	nH	0.0100	0.009976	0.000035	0.009965
$C_{gd}$	pF	0.0100	0.009921	0.000051	0.009918
$R_{ds}$	$\Omega$	552.00	550.69	3.48	560.59
$R_d$	$\Omega$	4.0000	3.8589	0.0956	4.0337
$R_s$	$\Omega$	1.5000	1.6534	0.0939	1.6626
$R_{g+R_i}$	$\Omega$	5.4100	5.1786	0.1231	5.248
$R_g$	$\Omega$	0.1500	1.5104	0.9276	1.5570
$R_i$	$\Omega$	5.2300	3.6682	1.0507	3.6910

从表 1 中, 我们可以看到大多数参数都比较接近真实值, 但是  $R_i$  和  $R_g$  偏离真实值较大. 事实上, 在  $C_{gd}$  很小, 工作频率比较低的情况下,  $R_i$  和  $R_g$  相当于串联在输入端(见图 1). 此时, 对 HFET 的 S 参数起作用的实际上是  $R_i + R_g$  的大小,  $R_i$  和  $R_g$  很难从中区分开. 因此, 优化结果当  $R_i$  偏大时,  $R_g$  就偏小. 表 1 中提取的  $R_i + R_g$  的值与真实的  $R_i + R_g$  相差不大也可以证实是这种情况. 这个问题对于用其它优化算法从 S 参数来提取 HFET 小信号等效电路模型参数也是同样存在的.

#### 3.2 从噪声化模拟测量数据提取模型参数衡量测量数据误差带来的影响

为了检验测量数据中的误差情况对最终提取结果的影响, 我们给模拟测量数据加入噪声. 对于 S 参数的幅值和角度都引入标准方差为真实值 2% 的高斯噪声. 和精确到小数点后第 6 位的测量数据相

比, 2% 的高斯噪声是足够大了. 我们对模拟测量数据进行 50 次随机噪声化, 然后从这 50 个模拟测量数据中分别提取的小信号等效电路模型参数的统计值也列于表 1. 这 50 次实验中, 目标函数值一般在 0.025 附近. 实验结果表明提取的参数平均值还是比较接近真实值, 误差范围稍有扩大.  $R_i$  和  $R_g$  仍是制约提取参数精度的主要因素.

#### 3.3 确定的 $R_g$ 对提取的模型参数的影响

从以上两个实验来看,  $R_i$  和  $R_g$  是提取参数精度进一步提高的瓶颈. 如果  $R_i$  或  $R_g$  能够得以准确地确定, 相信其它参数的精度也能够有更大的提高. 相比之下,  $R_g$  更容易通过计算或实验确定<sup>[8]</sup>. 为此, 我们将优化过程中  $R_g$  的值确定为真实值 0.15. 结果我们得到了更接近于真实值的模型参数, 见表 2. 此时目标函数值为  $5 \times 10^{-8}$ .

表 2  $R_g = 0.15$  时从理想的模拟测量数据提取的其它模型参数值

Table 2 Extracting Other Parameters of Model from Ideal Simulated Measurement Data when  $R_g = 0.15$

$\tau/\text{ps}$	$C_{ds}/\text{pF}$	$L_g/\text{nH}$	$C_{gs}/\text{pF}$	$G_m/\text{mS}$	$L_d/\text{nH}$
5.0015	0.10000	0.17997	0.28011	24.509	0.15001
$L_s/\text{nH}$	$C_{gd}/\text{pF}$	$R_{ds}/\Omega$	$R_d/\Omega$	$R_s/\Omega$	$R_g/\Omega$
0.01000	0.00999	551.79	3.9851	1.5153	5.2097

由此可见,结合实验方法测量的  $R_g$  参数值,模拟退火优化算法可以得到十分精确的模型参数值.

## 4 结论

我们用模拟退火算法来提取 HFET 的小信号等效电路模型参数. 由于模拟退火算法是一种全局优化算法,因此优化结果不再依赖于初始值的选取. 实验结果表明, 模拟退火算法可以准确地从  $S$  参数提取小信号等效电路模型参数. 并且能在很大程度上容忍测量带来的误差. 如果用实验测量等方法确定  $R_g$  的值, 优化结果可以得到相当精确的解. 另外, 模拟退火算法的可移植性很好, 仅需很小的改动就可以用于 HBT、电容、电感等微波器件的等效电路

参数提取.

## 参考文献

- [1] Peter H. Ladbrooke, "MMIC Design: GaAs FETs and HEMTs", Artech House, 1989.
- [2] Fujiang Lin and Gunter Kompa, IEEE Trans. MTT, 1994, **42**(7): 1114—1120.
- [3] H. Kondoh, IEEE MTT-S Symp. Dig., Baltimore, MD, 1986, 377—380.
- [4] C. Van Niekerk and P. Meyer, Microwave Opt. Technol. Lett., 1996, **11**(4): 281—284.
- [5] C. Van Niekerk and P. Meyer, IEEE Trans. MTT, 1998, **46**(11): 1620—1626.
- [6] CHEN Huikan, Theory on Active Network and Negative Feed-Back Amplifier, Science Press, Beijing 1987. Chapter2 (in Chinese) [陈惠开, 有源网络与负反馈放大器理论, 科学出版社, 1987, 第二章].
- [7] Dean A. Frickey, IEEE Trans. MTT, 1994, **42**(2): 205—211.
- [8] MU Fuchen, LI Zhiguo, ZHANG Wanrong et al., Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(3): 250—253 (in Chinese) [穆甫臣, 李志国, 张万荣, 等, 半导体学报, 1999, **20**(3): 250—253].

## HFET Small Signal Model Extraction from $S$ Parameters Using Simulated Annealing Algorithm

CHEN Jun and LIU Xun-chun

(Microelectronics R&D Center, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100010, China)

**Abstract:** In the design of microwave devices and integrated circuits, it is very important to extract the HFET small signal equalized circuit model accurately. The solution of HFET model extraction with high quality using the simulated annealing algorithm is obtained. The solution is the global optimum without any influence of the initial value on it. What's more, the method avoids the non-unique solution occurring frequently when the local optimum algorithm is used. Provided that the value of gate resistance is acquired from measurement, the precision of the solution can be improved further. The method can also be used to extract the model parameters of HBT, capacitor and inductor.

**Key words:** parameter extraction; simulated annealing algorithm; HFET;  $S$  parameter; small signal equivalent circuit model

**EEACC:** 1350F; 2560B; 2560S

**Article ID:** 0253-4177(2001)01-0079-04

CHEN Jun was born in 1973. He is currently pursuing the Ph. D. degree in Microelectronics R&D Center, CAS. His research interests are compound semiconductor devices and MMICs.

LIU Xun-chun was born in 1943. He is a professor in Microelectronics R&D Center, CAS. His research interests are compound semiconductor devices and high density plasma etching technology.

Received 14 August 1999, revised manuscript received 27 October 1999

© 2001 The Chinese Institute of Electronics