

用于 InP HBT 的 Agilent HBT 模型参数提取流程*

何佳† 孙玲玲 刘军

(杭州电子科技大学微电子 CAD 研究所, 杭州 310018)

摘要: 介绍了 Agilent HBT 大信号模型参数提取方法, 继承并改进了 Gummel-Poon 模型和 VBIC 模型参数的提取方法, 以及对分布电容、本征电阻和渡越时间的参数提取技术, 并对单指 InP HBT 器件进行了测量和仿真. 实验结果表明, 该模型对 InP HBT 直流特性及 50MHz~25GHz 频率范围内的交流小信号特性都能进行较好的表征.

关键词: Agilent HBT; InP; 大信号; 模型; 参数提取
EACCC: 1220; 1350

中图分类号: TN386 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0443-05

1 引言

Agilent HBT (Agilent heterojunction bipolar transistor) 模型^[1] 是基于 UCSD HBT 模型^[2] 开发而来的适用于高频高功率设计的大信号 HBT 模型, 该模型有着与其他 III-V 族化合物 HBT 模型相比独到的优点: (1) 电荷模型包含了一个描述集电极可变渡越时间的公式^[9], 从而经验性地估计了在 GaAs 和 InP 集电极中由电场决定的电子漂移速度; (2) 其理想集射电流有其独立的饱和电流 I_{sb} 和理想因子 N_s , 这与 HICUM 和 VBIC^[3] 模型相似, 因此在 Gummel-Poon 和 UCSD HBT 中的参数 Bf 没有用到, 这样的表示方法符合器件实际特点, 因为在 III-V 族 HBT 中, 由于异质结的作用, 器件的基电流并不是按比例贡献给集电极电流的; (3) 模型 DC 电流的异质结效应由基射结参数 I_{sa} 和 N_a 以及基集结参数 I_{sb} 和 N_b 表示, 而参数 I_{sa} 和 I_{sb} 各自有效地模拟了在基射和基集异质结发生的势垒现象; (4) 单异质结晶体管在高集射电流和电压下出现的 soft-knee 效应由参数 q3mod 表示, 而在双异质结中出现的 soft-knee 效应, q3mod 也可以表示. 基于以上特点, Agilent HBT 模型已成为 HBT 模型家族中非常重要的一员, 并集成在 ADS 等众多商用 CAD 软件中, 为广大设计人员所使用.

众所周知, 针对确定的器件及工艺, 在可用于该工艺下器件物理及电特性模拟的等效电路级模型拓扑结构及模型方程开发完成之后, 模型参数的精确提取, 即模型的精度成为该模型最终能否提供给设计方用于相关电路设计的关键, 模型参数提取的难度和复杂度则随着器件应用频率的升高而不断提

高. 这一问题在 III-V 族化合物 HBT 建模领域则显得更为突出. 本文尝试提供一套可用于提取 Agilent HBT 模型参数的提取技术, 供读者参考.

2 模型参数提取流程

由于模型许多参数之间存在着互相依赖的关系, 为了得到好的模拟结果, 遵循一个特定的提取顺序就显得尤为重要. 本文中的 Agilent HBT 模型, 使用如下的提取顺序:

2.1 测试结构寄生量、外体区电阻以及 R_{bi} , R_{ci} 的提取

从模型的大信号拓扑图(图 1)中可见, 模型在本征部分之外仍然包含了寄生电容量 (C_{pbc} , C_{pbc} , C_{pcc}), 外体区电阻 (R_{bx} , R_{cx} , R_c) 和引线寄生电感量 (L_b , L_c , L_e). 提取该部分参数时, 首先可采用 open 结构, 测量模型的 S 参数, 将其转为 Y 参数, 直接从各自角频率关系曲线的斜率中提取寄生电容 C_{pbc} , C_{pbc} , C_{pcc} . 接着在集电极开路、基区高电流时测试器件共发射极结构二端口 S 参数, 而后转换为 Y 参数, 去除 open 结构引入寄生电容效应, 转换为 Z 参数矩阵, 推导其 Z 参数表达式(本文从略, 详细推导公式参见文献[5]), 可方便地获取晶体管外体区寄生电阻 R_{cx} , R_{bx} 和 R_c , 以及寄生电感量值 L_b , L_c , L_e .

集电极本征寄生电阻 R_{ci} 是为了反映管子的准饱和效应而设置的, 它的值将在与准饱和参数一起做 DC 曲线优化过程中得到. 另外, 基极本征寄生电阻 R_{bi} 可以通过器件的几何尺寸和掺杂浓度等物理特性进行估算, 在本文中采用优化参数 S_{11} 的方法得到.

* 国防科技重点实验室基金资助项目 (批准号: 9140c0605010702)

† 通信作者. Email: iamhejia@126.com

2006-12-29 收到

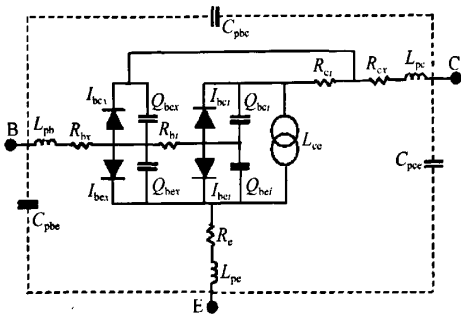


图 1 Agilent HBT 大信号拓扑
Fig. 1 Large-signal topology of the Agilent HBT model

2.2 CV 特性参数提取

针对 HBT 器件,模型中基极电荷方程是最基本的关系之一,而晶体管的结耗尽电荷是基极电荷方程的重要组成部分.从图 1 中可见,和其他的 HBT 模型相似,Agilent HBT 模型的结耗尽电荷也是由各自内外组分构成,分别由下标 i 和 x 表示.以基射结为例(基集结类似),提取时可参考文献[6]中的算法.考虑到在一定精度容差的范围内,模型中对内外组分电容的区分并不十分严格,本文在提取时使用了另一种较为简便的方法,即在 ICCAP 软件中直接使用 PEL 描述该模型结电容对电压的表达式,构造出仿真曲线分别为 cbe_s 和 cbc_s .通过测量固定频率下(本文取 500MHz)多偏置点(V_b 取 $-1.5 \sim 0.5V$,步进值 $0.1V$, V_c 为 $0V$)的 S 参数,使用软件中自带转换函数处理测量值可获得电容对偏压的依赖关系曲线 cbe_m 和 cbc_m .

以图 2 的基射结的电容电压关系曲线为例(基集结类似),由于 0 偏时总的结电容值 C_{je} 和 C_{jc} 以及正反偏时最大电容 C_{max} 和 C_{cmax} 均可从该测量曲线中直接读取,并且结电势 V_{jx} 和击穿电压 V_{pix} 的差值也可在图中估算出,只要采用一个简单的最优化流程即可获取结电势 V_{jx} ,以及结电容平滑因子

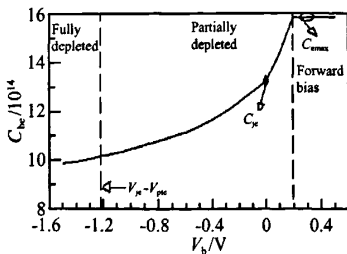


图 2 从电容电压关系曲线提取 C-V 模型参数
Fig. 2 Extract the C-V model parameters from capacitance-voltage plot

M_{jx} , 击穿电压 V_{pix} , 击穿后平滑因子 M_{jx} 的值,而比例区分因子 $A_{be,x}$ 和 $A_{bc,x}$ 在本文中均使用初值.最终电容对偏置电压关系的测试和仿真结果曲线见图 3 和图 4.

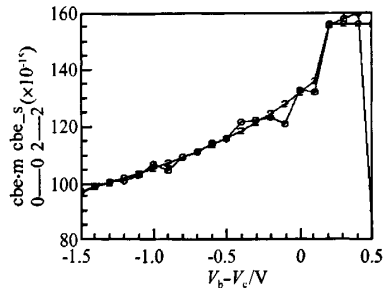


图 3 基射结电容测量和仿真结果对比
Fig. 3 Comparison of measured and simulated total base-emitter junctions capacitance

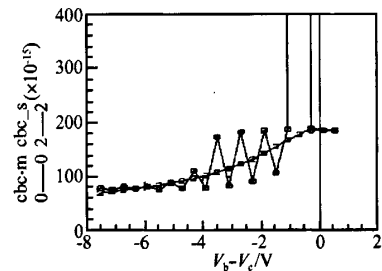


图 4 基集结电容测量和仿真结果对比
Fig. 4 Comparison of measured and simulated total base-collector junctions capacitance

2.3 DC 特性参数提取

集射结电流由正向和反向电流组成,公式中的修正因子 DD 基于 UCSD HBT 模型.包含在 q_b 中的 q_1 和 q_2 来自于 Gummel-Poon 模型,其中 q_1 表示厄利效应, q_2 表示高电流下的 Beta 滚动因子. I_{ca} 和 I_{cb} 分别模拟了基射和基集结电流的异质结效应. $q3mod$ 经验地反映了在高电流和低集电极电压下电流增益的下降现象.基集和基射结电流分别包含了内外两部分,由下标 i 和 x 表示,方程基本形式和意义均可参考 Gummel-Poon 或 VBIC 模型.详细电流表达式请参考文献[1],在此不予罗列.提取电流参数时可借鉴 Gummel-Poon 或 VBIC 模型电流模型参数提取方法,从正、反向 Gummel 曲线中提取.图 5,6 分别给出了测试的 HBT 器件正、反向 Gummel 曲线,其中正向测试条件为: $V_b = 0V, V_c = 0V, V_e = -1.2 \sim 0V$; 反向测试条件为: $V_b = 0V, V_c = 0V, V_e = -1.0 \sim 0V$,并对相关参数的提取区域作了标示^[3,4].模型各电流组分分别从虚线和 Y

轴截距中提取, 电流理想度因子 N_j 从虚线斜率中提取, 并和虚线斜率 Slope、温度相关电压 V_{tr} (本文取室温下 26mV) 满足以下关系:

$$\text{Slope} = \frac{1}{2.036 \times N_j V_{tr}} \quad (1)$$

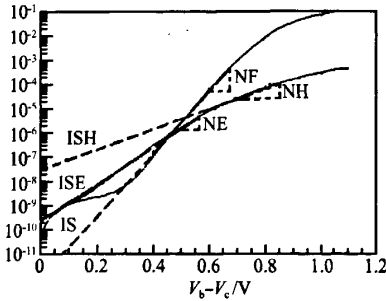


图 5 从正向 Gummel 曲线中提取电流模型参数

Fig. 5 Extract the current model parameters from forward Gummel plot

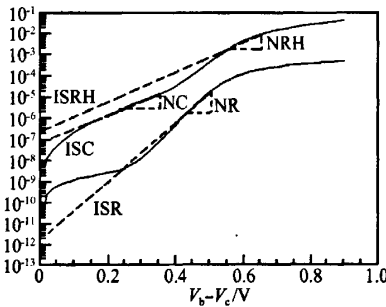


图 6 从反向 Gummel 曲线中提取电流模型参数

Fig. 6 Extract the current model parameters from re-ward Gummel plot

图 5, 6 没有给出 I_{es} 和 I_{eb} 的提取方式, 本文采用优化的方法来获得 I_{es} , I_{eb} , N_a 和 N_b 的值. 值得注意的是, 高水平工作条件下 InP HBT 器件自热等寄生效应影响加重, 室温下所得 I_{es} 和 I_{eb} 组分通常含多种寄生效应的影响, 在后续最优化流程中必须作较大调整. 此外, 受自热效应影响, 室温下从测试所得器件 I - V 特性中通常无法正确提取模型正、反向 Early 电压 V_{ar} 、 V_{ar} 的值, 不过在考虑热效应时根据测试数据, 可以从正反输出特性曲线中提取出它们的值. 具体提取方法见文献[3], 在此不予重复.

2.4 Krik 效应、渡越时间等参数的提取及热效应的考虑

在 Agilent HBT 模型中, 使用扩散电荷方程来描述器件的内部延时. 这些扩散电荷包含了三个方

面的元素: 基极延时电荷 (Q_{tb}), Krik 效应电荷 (Q_{krik}) 以及集电极延时电荷 (Q_{tc}). 由于 III-V 族化合物 HBT 基区高掺杂, 基极渡越时间参数 T_{tb} 可估算为常数, 而 Krik 效应导致在高电流条件下渡越时间的增加, 本模型关于 Krik 效应的方程继承了 HI-CUM 中的描述, 以上所述的详细电荷方程请参考文献[1].

本文用于少数载流子渡越时间以及 Kirk 效应模型参数提取算法主要借鉴于文献[8, 9], 部分参数借助最优技术获取, 篇幅所限, 这里不再展开. 条件所限, 实验室目前无法完成热效应测试及模型参数精确提取, 相关参数本次提取时暂使用默认值.

3 全模型参数仿真验证

以上各步提取所得模型参数已有较好表征能力, 仅需对部分参数进行微调和最优化即可获得理想的精度.

图 7 给出了正偏条件下 (本文取 $V_{ce}: 0V$; $V_{cb}: 0 \sim 1.5V$, Step: $0.03V$; $V_b: 0 \sim 0.8V$, Step: $0.08V$) 晶体管 B, C 极输出电流 I_b , I_c 曲线的测量和仿真对比结果. 图 8 给出了 $I_b = 10 \sim 210\mu A$, Step = $50\mu A$; $V_{ce} = 0 \sim 1.5V$, Step = $0.01V$ 条件下, 测量和仿真所得器件 I - V 特性对比, 从对比结果看, Agilent HBT 的电流模型可对 InP 基的 HBT 器件正向直流特性进行精确的表征. 图 9 则给出了 50MHz

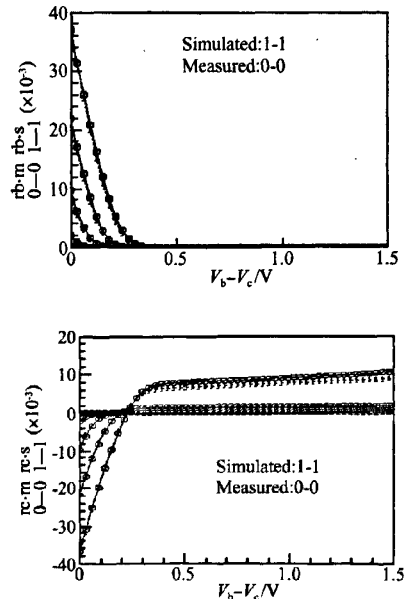


图 7 测量和仿真所得正向输出特性对比

Fig. 7 Comparison of measured and simulated forward output characteristics

~25GHz 频率范围内, $I_b = 160\mu\text{A}$, $V_{ce} = 1.5\text{V}$ 条件下测量和模型仿真所得 S 参数对比, 从对比结果来看, 除 S_{11} 在 20GHz 以上模型仿真和测试结果有微小差别外, 其余 S 参数的实、虚部在整个频率范围内都达到了较好的吻合. 仿真和测量所得 S 参数的良好吻合度, 验证了该模型参数可对 InP HBT 高频特性进行精确表征.

(注: 本文参数提取过程中采用的主要仪器及软件为: 矢量网络分析仪: Agilent E8363B, 直流偏置源: Agilent 4156C; 参数提取软件为 Agilent IC-CAP2004, 模型仿真调用的是 ADS2005A 中 hpees-fosim 仿真器)

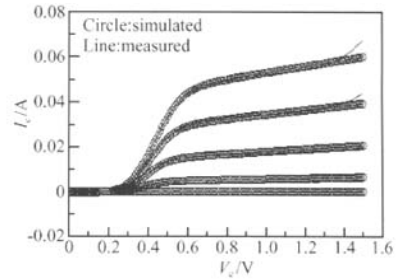


图 8 I - V 特性测量和仿真结果对比

Fig. 8 Comparison of measured and simulated current-voltage characteristics

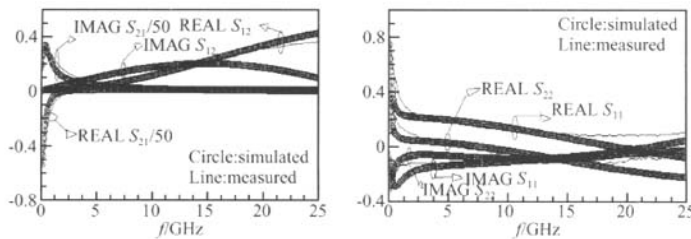


图 9 S 参数特性测量和仿真结果对比

Fig. 9 Comparison of measured and simulated S -parameters

4 结论

本文尝试使用单指 F_c 为 80GHz, F_{max} 约为 280GHz 的 InP 基底 HBT 器件, 以实际测量数据为基础, 应用模型参数提取软件 ICCAP 提取了 Agilent HBT 模型的参数, 最后使用 ADS2005A 对模型进行了仿真, 从最终的实验结果可以看出, 器件输出直流特性的测试与仿真值可以实现很好的拟合, 模型对 S 参数的模拟在频率从 50MHz 到 25GHz 的范围内都有较高的精度.

致谢 本文所用 InP 基 HBT 器件由中国电子科技集团公司第 13 研究所李献杰主任、蔡道民工程师提供, 在此深表感谢!

参考文献

[1] Agilent HBT MODEL <http://www.agilent.com>

- [2] UCSD HBT model. <http://hbt.ucsd.edu/>
- [3] Sischka F. Gummel-Poon BIPOLAR MODEL model description and parameter extraction. Agilent Technologies GmbH, <http://www.agilent.com>
- [4] Sischka F. Measuring and extraction the VBIC parameters. Agilent Technologies GmbH, <http://www.agilent.com>
- [5] Liu Jun, Sun Lingling. Parameter extraction of a III-V compound HBT model. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(5): 874 (in Chinese) [刘军, 孙玲玲. III-V 族化合物 HBT 模型参数提取. 半导体学报, 2006, 27(5): 874]
- [6] Liu Jun, Sun Lingling. A new direct method for HBT B-E & B-C distributed capacitances and intrinsic resistances extraction. Proceedings IEEE APMC, 2005
- [7] Ardouin B, Zimmer T, Celi D, et al. Transit time parameter extraction for the HICUM bipolar compact model. IEEE BCTM, 2001
- [8] Iwamoto M, Root D E, Scott J B, et al. Large-signal HBT model with improved collector transit time formulation for GaAs and InP technologies. IEEE MTT-S Digest, 2003, 635
- [9] Schroter M, Lee T Y. Physics-based minority charge and transit time modeling for bipolar transistors. IEEE Trans Electron Devices, 1999, 42(2): 288

Agilent HBT Model Parameters Extraction Procedure For InP HBT*

He Jia[†], Sun Lingling, and Liu Jun

(*Microelectronic CAD Center, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China*)

Abstract: This paper introduces the methodology to extract the parameters of Agilent HBT large signal model, which succeeded to and improved the traditional extract methodology of Gummel-Poon and VBIC models, and the extract technique about distributed capacitance, intrinsic resistances and transit time parameters. At last, we measured and simulated the single-finger InP HBT device, extracted the parameters of Agilent HBT model. The experimentation results verify that, this model has a high precision for InP HBTs' DC characterizations, and within the frequency range from 50MHz to 25GHz, it is also suitable for AC small-signal characterizations' representation.

Key words: Agilent HBT; InP; large-signal; model; parameter extract

EEACC: 1220; 1350

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0443-05

* Project supported by the Foundation of Key Laboratory of Defence Technology (No.9140c0605010702)

[†] Corresponding author. Email: iamhejia@126.com

Received 29 December 2006