

BJT 动态模型参数相关提取方法¹

郝 跃 刘 志 镜

(西安电子科技大学微电子所 西安 710071)

摘 要 本文提出一种利用双极晶体管 (BJT) 静态和动态参数相关性, 准确提取器件动态模型参数的新方法, 并验证了该方法的可行性和实用性。

关键词 双极晶体管, 器件模型, 参数表征

中图分类号 TN32

1 引 言

由于受测试环境和分布参数影响, 晶体管动态模型参数的在线提取一直是困难的。对于 HBT 这样的超高速器件, 即使在封装以后其动态参数测量仍然困难^[1-4]。本文首先提出利用 BJT 静态与动态参数的相关性获取器件的动态特征参数。该方法可降低对测试系统的要求, 尤其是对高速和超高速双极晶体管动态参数的在线获取和精确表征有重要的作用^[4]。本文论述了其理论和应用结果。

2 相关模型和提取策略

无论是同质 BJT 或 HBT, 目前常用的器件模型仍是 GP 模型和改进的 EM 模型^[5-6]。它们都是依靠 BJT 的基区、集电区和发射区电荷来控制 and 确定器件的静态和动态特性的。其动态特性主要是难于对晶体管正向和反向渡越时间 τ_f 和 τ_r 以及发射结和集电结电容参数的表征。本文首先建立其静态与动态参数的关系。

2.1 结电容参数的表征

设 BJT 中归一化的基区总电荷为 q_B , 它可以表示为

$$q_B = 1 + q_c + q_e + q_f + q_r, \quad (1)$$

式中 q_c 和 q_e 分别为集电结和发射结的归一化电荷; q_f 和 q_r 为由发射区和集电区注入基区的归一化电荷。首先建立集电结动态参数与静态特性的相关模型。由于

$$q_c = \int_0^{V_{bc}} C_{jc}(V) dV / Q_{B0}, \quad (2)$$

¹ 1995-01-11 收到, 1995-08-01 定稿
国家博士点基金资助课题

式中 Q_{B0} 为零偏压时基区总电荷, C_{jc} 为集电结电容, V_{bc} 为结的外加偏压。由一般反偏势垒电容关系知道

$$C_{jc}(V) = C_{jc0}(1 - V/\Phi_c)^{-M_c} \quad (3)$$

式中 C_{jc0} 为零偏时势垒电容、 Φ_c 为内建电势、 M_c 为电容梯度因子。于是

$$q_c = -C_{jc0}\Phi_c^{M_c}[(\Phi_c - V_{bc})^{1-M_c} - \Phi_c^{1-M_c}]/[Q_{B0}(1 - M_c)], \quad (4)$$

以及

$$\partial q_c / \partial V_{bc} = C_{jc}(V_{bc}) / Q_{B0}. \quad (5)$$

在中小工作电流和较大 V_{bc} 偏置条件下, 正向工作的 BJT 集电极电流 I_c 可表示为

$$I_c = I_S [\exp(qV_{be}/N_f kT) - 1] / (1 + q_c), \quad (6)$$

式中 I_S 为饱和电流, V_{be} 为发射结偏压, N_f 为正向发射系数, k 为 Boltzmann 常数, T 为温度。若令正向跨导为 $y_{oc} = \partial I_c / \partial V_{bc}$, 则

$$y_{oc}/I_c^2 = \{I_S [\exp(qV_{be}/N_f kT) - 1]\}^{-1} C_{jc}(V_{bc}) / Q_{B0}. \quad (7)$$

于是

$$\begin{aligned} \ln(y_{oc}/I_c^2) &= \ln\{(\Phi_c^{M_c}/Q_{B0})C_{jc0}[I_S \exp(qV_{be}/(N_f kT) - 1)]^{-1}\} \\ &\quad - M_c \ln(1 - V_{bc}/\Phi_c). \end{aligned}$$

由于上式右边第一项与 V_{bc} 无关, 因此, 考虑 V_{bc} 与 $\ln(y_{oc}/I_c^2)$ 的关系, 可使上式变为

$$\ln(y_{oc}/I_c^2) = C - M_c \ln(1 - V_{bc}/\Phi_c), \quad (8)$$

式中 C 为常数。根据 $\ln(y_{oc}/I_c^2) \sim V_{bc}$, 利用参数优化提取方法^[7]可成功地获得参数 M_c 和 Φ_c 。

又由于

$$I_c/y_{oc} = Q_{B0}\Phi_c^{-M_c}V_{bc}^{M_c}/C_{jc0} + V_{bc}/(1 - M_c), \quad (9)$$

并利用 (3) 式的 C - V 特性联立, 在已知 M_c 和 Φ_c 情况, 精确得到 C_{jc0} 和 Q_{B0} 。参数 Q_{B0} 对确定 τ_f 和 τ_r 极为重要。

若全反向跨导为 $y_{oe} = \partial I_e / \partial V_{be}$, 利用 $\ln(y_{oe}/I_c^2) \sim V_{be}$, $I_e/y_{oe} \sim V_{be}$ 以及 $C(V_{be}) \sim V_{be}$ 可方便获取 C_{je0} , M_e 和 Φ_e 参数。由于 BJT 的结 C - V 特性对于器件在线或封装后的测试都是较容易的, 并可以通过参数提取方法去除寄生电容影响^[7], 得到精确的 Q_{B0} 和电容参数。

2.2 τ_f 和 τ_r 的表征方法

BJT 的大电流特性可以用正向和反向膝点电流 I_{KF} 和 I_{KR} 表征。GP 模型中

$$q_f = I_S \{\exp[qV_{be}/(N_f kT)] - 1\} / I_{KF}, \quad q_r = I_S \{\exp[qV_{bc}/(N_r kT)] - 1\} / I_{KR},$$

同时 $\tau_f = Q_{B0}/I_{KF}$, $\tau_r = Q_{B0}/I_{KR}$ 。 I_{KF} 和 I_{KR} 可利用 Gummel 图表征。于是利用 Q_{B0} 、 I_{KF} 和 I_{KR} 便可得到 τ_f 和 τ_r , 从而完成 BJT 动态参数的获取。

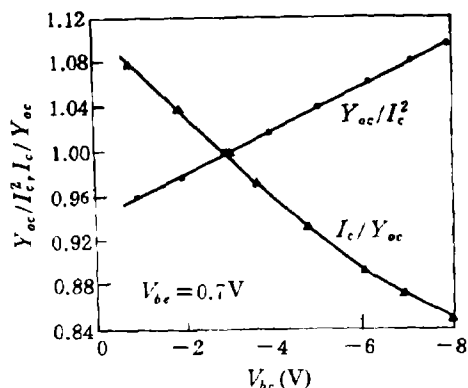


图 1 y_{oe}/I_c^2 , $I_c/y_{oe} \sim V_{be}$ 曲线

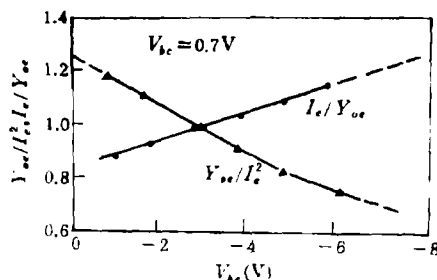


图 2 y_{oe}/I_c^2 , $I_c/y_{oe} \sim V_{be}$ 曲线

3 实验验证和分析

对 ECL 高速集成电路中 BJT 动态参数进行相关表征, 并与实验结果比较。图 1 和图 2 分别给出了实测 y_{oe}/I_c^2 、 $I_c/y_{oe} \sim V_{be}$ 和 y_{oe}/I_c^2 、 $I_c/y_{oe} \sim V_{be}$ 曲线, 并分别在 $V_{be} = -3V$ 和 $V_{be} = -3V$ 处进行参数归一化, 其归一化因子分别为 $92.1(V \cdot A)^{-1}$ 、 $57.6V$ 和 $101.7(V \cdot A)^{-1}$ 、 $28.2V$ 。从特性中得到的 $Q_{B0} = 5.49 \times 10^{-10}C$ 。图 3 和图 4 分别给出了晶体管的正向和反向 Gummel 图, 从中得到 I_{KF} 和 I_{KR} 分别为 $267mA$ 和 $24mA$ 。用本文提出的方法在 IC 中测阶段得到的动态参数与器件封装后实测参数如表 1 所示, 可以看出两者间的误差是比较小的。即使最难表征的参数 τ_r 误差也仅为 6.3%, 这证明本文方法的精度能满足要求。本文方法用于 BJT 微波晶体管也取得很好结果, 这无疑对微波和毫米波器件的参数表征提供了一条新途径。

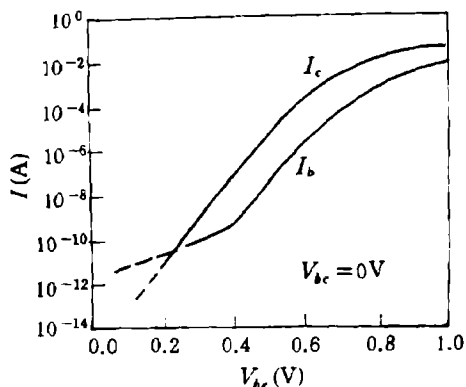


图 3 正向 Gummel 图

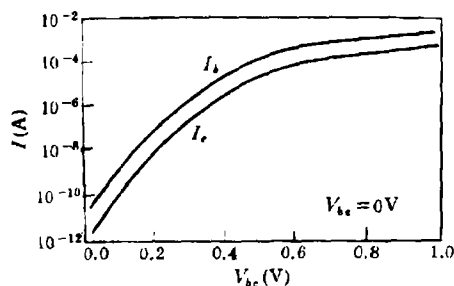


图 4 反向 Gummel 图

表 1 本文方法参数提取值与实测值比较

方法	τ_f (ns)	τ_r (ns)	C_{jc0} pF	C_{je0} pF	Φ_c (V)	Φ_e (V)	M_c	M_e
本文方法	2.06	22.88	4.25	11.56	0.87	0.76	0.356	0.412
实测	1.97	24.40	4.3	11.6	0.83	0.77	0.36	0.42
误差 (%)	4.6	6.3	1.2	0.03	4.8	1.3	1.1	1.9

4 结 论

利用 BJT 静态和动态参数的相关性, 建立基于参数可测性的模型和方法。利用 $y_o/I^2(c, e)$, $I/y_o(c, e)$ 与 $V_b(c, e)$ 的关系以及 $C-V$ 特性, 得到了表征 BJT 模型全部动态参数。实验结果表明了该方法能适用于同质和异质结构的 BJT, 为动态参数在线提取和精确表征提供了一种新方法。

参 考 文 献

- [1] Zuberek W M, et al. IEE Proc.-G., 1994, 141(1): 129-134.
- [2] Kuntman K. Int. J. of Electronics, 1993, 73(4): 541-552.
- [3] Park J S. IEEE Trans. on ED, 1989, ED-36(1): 88-95.
- [4] Liou J I, Yuan J S. IEE Proc.-G., 1991, 138(1): 97-102.
- [5] Hafizi M E, et al. IEEE Trans. on ED, 1990, ED-37(10): 2121-2129.
- [6] Gummel H K, Poon H C. Bell Sys. and Tech. J., 1970, 49(5): 827-852.
- [7] 郝跃, 贾新章. 电子学报, 1989, 17(6): 105-107.

THE CORRELATIVE EXTRACTION METHOD FOR BJT DYNAMIC MODEL PARAMETERS

Hao Yue Liu Zhijing

(Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract A new method of extracting BJT dynamic model parameters is proposed by using the correlation between dynamic and static model parameters. Finally, the feasibility and utility of the method are demonstrated.

Key words Bipolar transistor, Device model, Parameter measurement

郝跃: 男, 1958年生, 教授, 现从事微电路 CAD、IC 可制造性和统计优化、模型和模拟等方面的研究工作。

刘志镜: 男, 1957年生, 副教授, 现从事电路 CAD、电路优化设计和计算机图形学等方面的研究工作。