

双极晶体管的 $1/f$ 噪声参数 f_L 和 γ 的测量 提取——噪声电流谱测量法

罗涛 戴逸松 辛德胜

(东南大学无线电系, 南京 210018) (吉林工业大学, 长春 130025)

摘要 晶体管低频噪声主要是 $1/f$ 噪声, 其参数 f_L 和 γ 的测出, 不仅对低频低噪声设计, 而且对于研究半导体噪声机理以及应用它来分析半导体内部缺陷或表面清洁处理情况都有着重要意义。本文给出了双极晶体管的 $1/f$ 噪声参数的测量方法、系统及实例, 获得了已有噪声测量系统所不能给出的参数。

关键词 噪声测量; $1/f$ 噪声; f_L 和 γ 参数

1. 引言

噪声机理研究基本表明: $1/f$ 噪声的产生机制是由于半导体器件内部有缺陷或表面清洁处理不好所致^[1], 它与器件可靠性有着一定的关系。而且, 半导体器件的低频段噪声主要就是 $1/f$ 噪声, 低噪声设计的主要目的就是降低 $1/f$ 噪声水平。

双极晶体管的 $1/f$ 噪声可用(1)式表达^[2]

$$I_i^2 = 2ef_L I_b \gamma / f \quad (1)$$

式中 I_i^2 为 $1/f$ 噪声源的噪声电流功率谱密度 (亦称 $1/f$ 噪声均方电流); e 为电子电量; I_b 为基区电流; f 为频率; f_L 为噪声转折频率; γ 为噪声指数。由此可见, $1/f$ 噪声的主要参数是 f_L 和 γ 。

由于目前的噪声测量仪器只能给出几个点频或几个固定频宽的噪声^[2,3], 无法给出 f_L 和 γ 参数。若想全面了解半导体噪声机理以及用低频噪声分析器件的内在缺陷和可靠性等, 必须对其噪声谱进行测量。

鉴于 $1/f$ 噪声的重要性及其参数 f_L 和 γ 测试的困难。本文给出了 f_L 和 γ 测量提取的方法和低频噪声谱测量系统。文末给出了针对 3DX7 (苏州半导体厂, 中国) 的 f_L 和 γ 进行测量的实例和结果。

2. $1/f$ 噪声参数 f_L 和 γ 的测量方法

噪声机理研究并得到充分承认的结果表明^[1-3], 双极晶体管等效输入噪声电流谱密度

1992.01.21 收到, 1992.05.25 定稿。

罗涛 男, 1961 年生, 博士后, 主要从事神经网络在随机数字信号处理中的应用、电子电路噪声理论及其在微弱信号检测和处理中的应用等研究工作。现在深圳长虹通讯设备有限公司通信技术研究所从事程控交换技术和电信网的研究和开发工作。邮政编码为 518028。

戴逸松 男 1936 年生, 教授, 博士生导师, 现从事微弱信号检测理论和技术、神经网络理论和应用、谱估计等方面的研究工作。

辛德胜 男, 1950 年生, 讲师, 现主要从事光电技术在工业检测中的应用等研究工作。

(只考虑中低频)^[4]

$$S_i(f) = 2eI_b + 2ef_L I_b^2 / f + 2eI_c / \beta_0^2 \quad (2)$$

式中 I_c 为集电极工作点电流; β_0 为短路直流增益. 如果设 $A = 2eI_b + 2eI_c / \beta_0^2$, $B = 2ef_L I_b^2$, 则(2)式变为

$$S_i(f) = A + B/f \quad (3)$$

可见, A 表示白噪声项, 中频段主要是 A . B/f 表示 $1/f$ 噪声项, 低频段噪声主要是 B/f , 当然也包含白噪声 A .

如果能测得双极晶体管两个不同基极偏置电流 I_{b1} 和 I_{b2} 情况下的 B 参数 B_1 和 B_2 , 则由 $B = 2ef_L I_b^2$ 知

$$B_1 = 2ef_L I_{b1}^2 \quad (4)$$

$$B_2 = 2ef_L I_{b2}^2 \quad (5)$$

(4)式与(5)式相比并整理得

$$\gamma = \ln(B_1/B_2) / \ln(I_{b1}/I_{b2}) \quad (6)$$

将(6)式代入(4)和(5)式分别有

$$f_L = B_1 / (2eI_{b1}^2) \quad (7a)$$

$$f_L = B_2 / (2eI_{b2}^2) \quad (7b)$$

由(6)和(7)式可知, 要得到 f_L 和 γ , 必须首先得知 B_1 和 B_2 , 即 B 参数. 下面给出获取 B 的方法.

由(3)式可知, A, B 分别为白噪声和 $1/f$ 噪声项. 它们可用双极晶体管噪声电流谱的方法获得. 为使 B 准确, 参数 A, B 须通过加权最小二乘曲线拟合方法优化提取.

设在各采样频率点 f_j 按(3)式计算得到的噪声电流谱为 $S(f_j)$, 而测量值为 S_j , 则有目标函数

$$\begin{aligned} O &= \sum_{j=1}^n \omega(f_j) [S(f_j) - S_j]^2 \\ &= \sum_{j=1}^n \omega(f_j) [A + B/f_j - S_j]^2 \end{aligned} \quad (8)$$

式中 n 为测量频率点数; $\omega(f)$ 为加权函数. 由于 S_j 值随频率 f_j 增高而增大, 所以 S_j 按 $1/f$ 规律下降. 趋于中频时, 为白噪声, 并且低频 S_j 值比中频 S_j 值高多个数量级. 为使 A, B 参数拟合准确, 经试验知, $\omega(f) = f$ 最为适宜. 代入(8)式, 并求 $\partial O / \partial A = 0$ 和 $\partial O / \partial B = 0$, 整理得方程组

$$\left. \begin{aligned} A \sum f_j + B n &= \sum f_j S_j \\ A n + B \sum f_j^{-1} &= \sum S_j \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

解(9)式, 即得 B 参数. 因此可见, 只要得到中低频噪声电流谱的测量值, 由(9)式即可求得 B .

3. 噪声谱的测量系统和实例

低频噪声电流谱测量原理是根据总等效输入噪声电压谱密度^[4]

$$S_n(f) = S_e(f) + S_i(f)R_s^2 + 2C\sqrt{S_e(f)S_i(f)}R_s \quad (10)$$

当源电阻 R_s 选得足够大时,有

$$S_i(f)R_s^2 \gg S_e(f) + 2CR_s\sqrt{S_e(f)S_i(f)}$$

那么,有

$$S_n(f) = S_i(f)R_s^2$$

因而有

$$S_i(f) = S_n(f)/R_s^2 \quad (11)$$

也就是说,当 R_s 足够大时,测得总等效输入噪声电压谱除以 R_s^2 ,即为 $S_i(f)$ 。

本文的低频噪声谱测量系统构成如图 1 所示。被测元器件的噪声经低噪声高精度测量放大器输出,送至 FFT 分析仪 (CF-920, 日本小野测器),对输出噪声谱 S_o 进行谱测量。则被测器件的等效输入噪声电压功率谱密度为

$$S_n(f) = S_o(f)/|K(f)|^2 \quad (12)$$

式中 $K(f)$ 是 R_s 足够大时的系统传递函数。因此,系统工作分 4 步: (1)首先测量传递函数 $K(f)$ (包含被测元件至放大器输出)。这里采用 CF-920 的 S 通道输出扫描正弦信号至被测元器件输入端,经放大后送至 CF-920 的 B 通道,由 CF-920 自动完成 $K(f)$ 的测量。(2)测量输出噪声谱 S_o 。(3)将送入计算机的上述数据按(12)式计算得到 $S_n(f)$ 。(4)由(11)式计算得到等效输入噪声电流谱 $S_i(f)$ 。

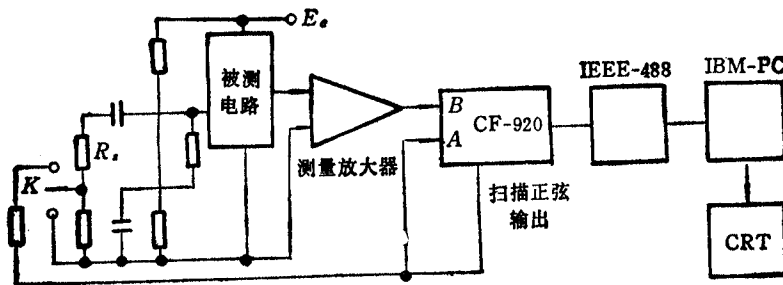


图 1 低频噪声谱自动测量系统的框图

综上所述, f_L 和 γ 参数的整个测量提取过程是: (1)由噪声测量系统测出 $S_i(f)$ 。(2)由测得的 $S_i(f)$,根据加权最小二乘拟合(9)式,得参数 B (对应不同 I_{b1} 和 I_{b2} ,有 B_1 和 B_2)。(3)根据(6)式和(7)计算得参数 f_L 和 γ 。整个测量提取过程由计算机控制自动完成,精度主要取决于 CF-920。

作为一个实例,针对 3DX7 型号双极晶体管(苏州半导体厂,中国)的 $1/f$ 噪声参数 f_L 和 γ 进行了测量提取,得到其参数值分别为: $f_L = 5.433 \times 10^8 \text{Hz}$, $\gamma = 1.52$ 。

参 考 文 献

- [1] L. Loreck et al., *IEEE Electron Device Lett.*, EDL-5(1984)1, 9.
- [2] C. D. Motchenbacken, F. C. Fitchen, *Low-Noise Electronic Design*, John Wiley & Sons, Inc., N. Y., (1973), Chapter 4.
- [3] M. Macucci et al., *IEEE Trans. on IM*, IM-40(1991)1, 7-12.
- [4] 罗涛,戴逸松,电子学报,18(1990)6,79-86.

MEASUREMENT OF PARAMETERS f_L AND γ OF $1/f$
NOISE IN BJT—BASED ON THE MEASURING
METHOD OF NOISE CURRENT SPECTRA

Luo Tao

(*Southeast University, Nanjing 210018*)

Dai Yisong, Xin Desheng

(*Jilin University of Technology, Changchun 130025*)

Abstract The method and system for measuring parameters of f_L and γ of $1/f$ noise in BJT are presented. Finally, the examples are given.

Key words Noise measurement; $1/f$ noise; f_L and γ parameters