

大电流时晶体管电流增益下降的物理原因*

林昭炯 许惠英

(北京大学物理系)

1. 引言 众所周知,晶体管的电流增益与收集极电流有关,开始它随收集极电流增大而增大,达到一最大值后,它又随收集极电流的进一步增大而逐渐减小. 所谓大电流时电流增益下降,就是指收集极电流大于电流增益达最大值所对应的收集极电流后电流增益下降的现象.

关于大电流时电流增益下降的物理原因,过去有两种解释: 一是由 Webster 提出的基区电导调制效应^[1]; 另一是由 Kirk 提出的有效基区展宽效应^[2]. 后来许多作者^[3-7]在分析室温下大电流时电流增益随收集极电流的变化曲线($\beta-I_C$ 曲线)和特征频率随收集极电流的变化曲线(f_T-I_C 曲线)的基础上,实验证明了有效基区展宽效应是导致大电流下电流增益下降的主要原因.

本文从另一角度,即从晶体管的电流增益的温度特性的角度证明大电流时晶体管电

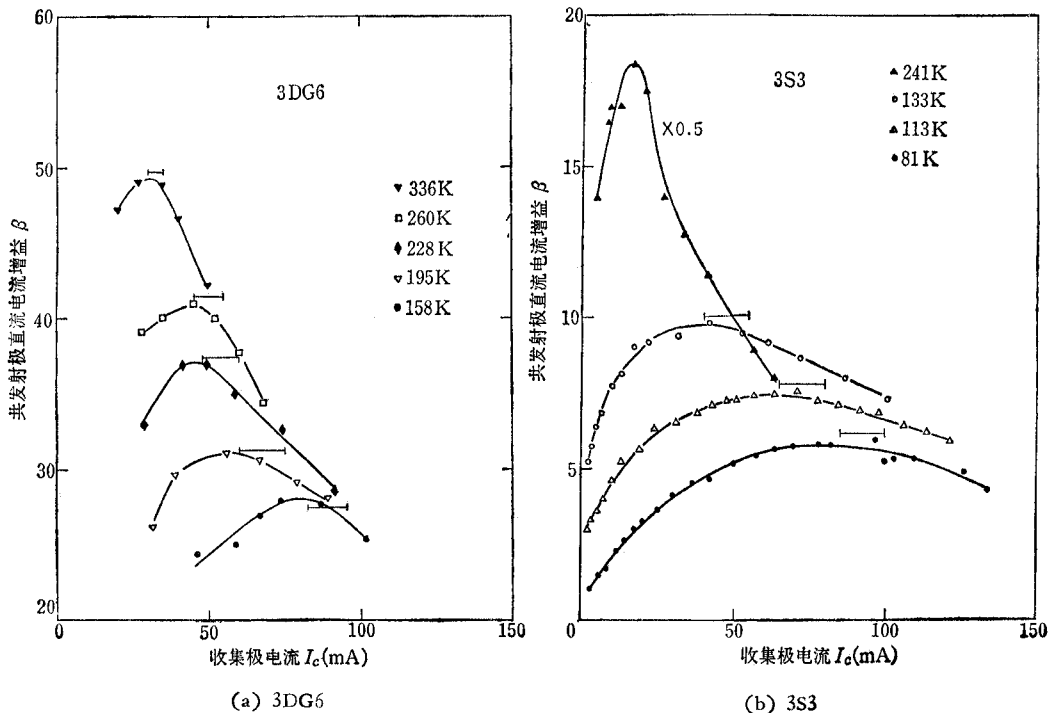


图1 3DG6和3S3的 $\beta-I_C$ 曲线

* 1983年6月13日收到,1984年11月8日修改定稿.

流增益下降的物理原因是有效基区展宽效应。

2. 结果和讨论 在 77K (液氮温度)到 350K 的温度范围内, 测量了两种双极型 $n-p-n$, 硅平面扩散晶体管的共发射极直流电流增益 β 随收集极电流 I_c 的变化曲线, 即 $\beta-I_c$ 曲线. 被测晶体管的型号为 3DG6 和 3S3. 制作它们的原材料都是外延硅单晶片. 测量时, 发射极与收集极间外加偏压为 4V. 测得的 $\beta-I_c$ 曲线如图 1 所示. 图中不同温度下的 $\beta-I_c$ 曲线上都带有一段横线, 其左端表示 β 从最大值开始下降时所对应的收集极电流; 其右端表示 β 从最大值下降了 5% 时所对应的收集极电流; 线段的长度就是上述两电流值的差值.

根据有效基区展宽效应的观点^[2], 收集极电流密度达某值 J_{co} 后, β 就开始下降. 我们称 J_{co} 为临界收集极电流密度. 若收集结的有效面积为 A_c , 则有

$$I_{co} = J_{co}A_c,$$

式中 I_{co} 称为临界收集极电流. 它可从图 1 的 $\beta-I_c$ 曲线确定. 考虑到 $\beta-I_c$ 曲线测量和作图的误差对确定临界收集极电流 I_{co} 的影响, 在画临界收集极电流 I_{co} 与温度的关系曲线(图 2)时, 某一温度下的 I_{co} 不是用点来代表, 而是用一小直线段来表示. 图 2 为图

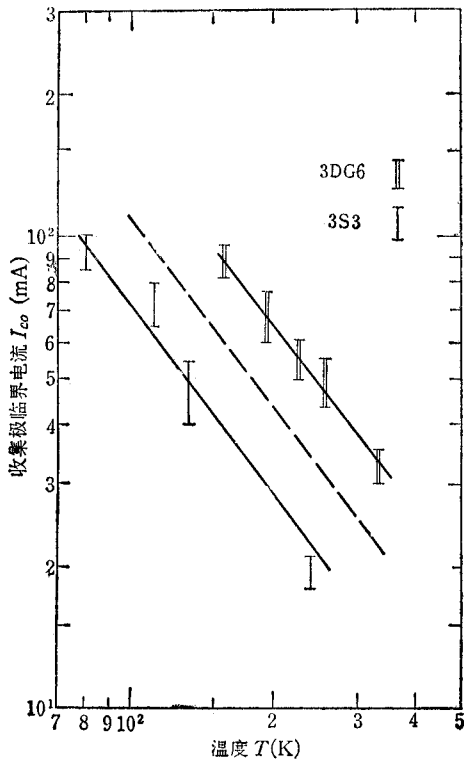


图 2 收集极临界电流与温度的关系

1 所示的两种晶体管的临界收集极电流与温度的关系. 图中每一直线段代表某一温度下由实验测定的临界收集极电流. 线段的长度(电流范围)与图 1 中直线段的长度(电流范围)一一对应. 线段长度代表的是临界收集极电流的误差范围. 虽然, 图 2 给出的是临界收集极电流随温度的变化规律, 但因

$$I_{co} = J_{co}A_{co},$$

所以图 2 也表示临界收集极电流密度随温度的变化规律.

下面将证明, 实验测定的 I_{co} 随温度变化的规律与从有效基展宽效应理论推导出来的 I_{co} 随温度变化的规律是一致的, 从而证明了大电流时电流增益下降的物理原因是有效基区展宽效应.

设 E_c 代表载流子漂移速度与电场成正比时电场的上限, E_s 代表达到极限漂移速度时所对应的电场强度. 若以 E 代表收集区的电场强度, 则当

$$E_c < E < E_s$$

时, 根据有效基区展宽效应理论, 可以求出 $n-p-n$ 晶体管的 β 开始下降时所对应的临界收集极电流密度为^[7]

$$J_{co} = qN_{DC}\mu_0 \sqrt{\left(\frac{V_c + V_{DC}}{W_c}\right)} E_c, \tag{1}$$

式中 q 为电子电荷量, N_{DC} 为收集区的掺杂浓度, μ_0 为电子的低场迁移率, V_C 为收集结的外加反向偏压, V_{CD} 为收集结的接触电势差, W_C 为收集区的厚度.

本实验发射极与收集极间外加偏压为 4V, 所测的晶体管收集区厚度约为 $5\mu\text{m}$, E 约为 $8 \times 10^3 \text{V/cm}$. 对于硅中的电子, 室温下, $E_C \approx 2 \times 10^3 \text{V/cm}$, $E_S \approx 3 \times 10^4 \text{V/cm}$ ^[8], 它们都随着温度下降而减小^[10]. 在本实验的温度范围内(尤其在较高的温度端), 正是属于 $E_C < E < E_S$ 的情况, 因此临界收集极电流密度 J_{CO} 可由 (1) 式确定.

(1) 式中 q 为常数, 在测量的温度范围内, 可近似地认为收集区的电子浓度为 N_{DC} , N_{DC} 和 W_C 与温度无关; 而收集结的接触电势差 V_{DC} 虽与温度有关, 但它对 $(V_C + V_{CD})$ 值的影响, 在 V_C 较大时, 可忽略不计. 于是, β 开始下降时所对应的临界收集极电流密度与温度的关系主要由 μ_0 和 E_C 与温度的关系决定. 我们所测晶体管的收集区的电阻率约为 $1-2 \Omega\text{-cm}$, 因此在所研究的温度范围内, 收集区的电子的低场迁移率 μ_0 主要由晶格散射决定. 对于晶格散射情况, 电子的低场迁移率与温度的关系为^[9]

$$\mu_0 = AT^{-2.6}, \quad (2)$$

式中 A 为与温度无关的系数.

根据文献[10]的结果,

$$E_C = \frac{1.51C}{\mu_0}, \quad (3)$$

式中 C 为纵声学波速度.

纵声学波可以看成是弹性波, 其速度为^[11]

$$C = \left(\frac{C_{II}}{\rho_0} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

式中 C_{II} 为弹性劲度常数, ρ_0 为介质密度. 因为 C_{II} 和密度 ρ_0 都与温度有关, 所以 C 也与温度有关. 密度与温度的关系直接反映在线性热膨胀系数与温度的关系上. 从文献[12]可知 C_{II} 和线性热膨胀系数随温度的变化是很小的, 而且硅的线性热膨胀的数值很小, 这表明 C 随温度变化是不显著的. 特别是与 μ_0 随温度的变化相比, C 随温度的变化就显得缓慢得多, 因此, 在考虑 E_C 随温度的变化时; 可以忽略 C 随温度变化的影响, 即 E_C 随温度的变化主要由 μ_0 决定. 这样, 在晶格散射情况下, 从 (2) 和 (3) 式可得

$$E_C \propto \mu_0^{-1} \propto T^{2.6} \quad (5)$$

由 (1), (2), (5) 式可推出

$$J_{CO} \propto T^{-1.3} \quad (6)$$

由 $I_{CO} = J_{CO}A_C$ 可得到大电流时 β 开始下降所对应的临界收集极电流与温度的关系为

$$I_{CO} = BT^{-1.3}$$

或

$$\ln I_{CO} = \ln B - 1.3 \ln T \quad (7)$$

(7) 式中 B 为与温度无关的系数. 显然, B 的数值与 N_{DC} , W_C , V_{CD} , 以及收集结面积有关, 因此晶体管结构参数不同, B 的数值也不同. 我们做实验选用的 $n-p-n$ 硅平面扩散晶体管的结构参数很相近; 图 2 的结果也表明它们的 B 值差别不大.

图 2 中虚线为 $T^{-1.3}$ 曲线, 其斜率为 -1.3 ; 两条实线分别为 3DG6 和 3S3 的实验点的

连线。从图可以看出,这两种晶体管的 β 开始下降时所对应的收集极电流(临界收集极电流)随温度的变化规律,在实验误差范围内,遵从 $T^{-1.3}$ 规律,即与基区展宽效应理论预期的结果一致。也就是说,我们从晶体管的电流增益温度特性的角度,证明了大电流时晶体管电流增益下降的物理原因主要是有效基区扩展效应。

最后,感谢秦国刚副教授仔细地阅读了稿件并提出了宝贵的意见。

参 考 文 献

- [1] W. M. Webster, *Proc. IRE*, **42**(1954), 914.
- [2] C. T. Kirk, *IEEE Trans. on ED*, **ED-9**(1962), 164.
- [3] R. J. Whitter and D. A. Tremere, *ibid.*, **ED16** (1969), 39.
- [4] D. L. Bowler and F. A. Lindholm, *ibid.*, **ED-20**(1973), 257.
- [5] P. L. Hower, *ibid.*, **ED-20** (1973), 426.
- [6] R. Kumar and L. P. Hunter, *ibid.*, **ED-22**(1975), 1031.
- [7] G. Rey, F. Dupuy and J. P. Bailbe, *Solid-State Electron.* **18**(1975), 863.
- [8] C. B. Norris and J. F. Gibbons, *IEEE Trans. on ED*, **ED-14**(1967), 38.
- [9] F. J. Morin, *Phys. Rev.*, **93**(1954), 62.
- [10] E. J. Ryder, *ibid.*, **90**(1951), 766.
- [11] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, p. 94, New York, John Wiley and Sons., Inc., 1956.
- [12] H. F. Wolf, *Silicon Semiconductor Data*, Signetics Corporation, 1969, p. 32.

VERIFICATION OF THE PHYSICAL REASON FOR THE CURRENT GAIN FALL-OFF AT HIGH CURRENTS

Lin Zhaohui, Xu Huiying

(Department of Physics, Beijing University)

Starting from the temperature characteristics of the transistor current gain, the temperature-dependent law of the collector current just as the current gain begins to fall-off is studied theoretically and experimentally. It is verified that the physical reason is the base widening effect.