第21卷第10期　　半　导　体　学　报　　Vol. 21, No. 10
2000年10月　　CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS　　Oct., 2000

用 V_{be}法对双极晶体管结温不均匀性的测量*

杨志伟　苗庆海　张德骏　张兴华　杨列勇

(山东大学物理系半导体教研室, 济南　250100)

摘要: 考虑到结温分布不均匀的情况, 对用 ΔV_{be}法测量双极型晶体管的结温进行了研究. 当结温分布均匀时, 测得的结温与测试电流无关; 当结温分布不均匀时, 小测试电流测得的结温高, 大测试电流测得的结温低, 测得结温随测试电流的变化范围随结温分布不均匀度的增加而增大. 这一现象可用来判别双极晶体管结温分布的不均匀性.

关键词: 双极晶体管; 结温; 测量
PACC: 7330; 7340N; 7309
中图分类号: TN321　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 0253-4177(2000)10-1028-04

Measurement of Junction Temperature Inhomogeneity of Bipolar Transistors by V_{be} Method*

YANG Zhi-wei, MIAO Qing-hai, ZHANG De-jun,
ZHANG Xing-hua and YANG Lie-yong

(*Department of Physics, Shandong University, Ji′nan　250100, China*)

Received 23 April 1999, revised manuscript received 11 November 1999

Abstract: For a uniform junction temperature, the measured junction temperature by ΔV_{be} method is inderendent of the test current, while for an inhomogeneous one, the measured temperature decreases with the test current increasing. The range measured junction temperature increases with the increase of the junction temperature inhomogeneity. This phenomenon can be used to estimate the junction temperature inhomogeneity of bipolar transistors without any damage on the package.

Key words: bipolar transistor; junction temperature; measurement
PACC: 7330; 7340N; 7309
Article ID: 0253-4177(2000)10-1028-04

---

* 国家自然科学基金资助项目(项目编号: 69576016) [Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69576016].

YANG Zhi-wei(杨志伟) male, born in 1970. He is a condidate for Ph. D., Department of Physics, Shandong University. He is engaging in Semiconductor Physics and Semiconduclor Device Physics. Email: spnj@jn-public.sd.cninfo.net

1999-04-23 收到, 1999-11-11 定稿

1　引言

双极型晶体管的发射结电流具有正温度系数, 当器件工作时很容易由于某种因素的诱导形成热电正反馈, 从而导致器件结温分布不均匀, 形成稳定或不稳定热斑[1]. 因而器件结温分布是否均匀是衡量其热电性能优劣的重要参数之一. 红外热像法是测量器件结温分布的常用方法, 然而红外热像法测量速度慢, 成本高, 而且只能测量未封装或开封器件. 电学测量方法相对红外热像法而言具有测量速度快、成本低、对器件无损伤等优点. 因而探索用电学测量方法测量晶体管结温分布的均匀性对于半导体器件的快速筛选具有重要意义. 冯士维等对用不同的偏置条件判断 GaAs MESFET 结温是否均匀作了研究并与红外热像法进行了对比[2,3], 除此之外我们尚未发现其它有关用电学方法测量晶体管结温分布不均匀性的报导. ΔV_{be}法是测量双极晶体管结温的一种常用方法, 通常不考虑器件结温分布不均匀的情况[4,5], 然而一个晶体管工作时其局部热斑处的温度完全可能比非热斑处的温度高出 100℃或更高[1,6—8]. 已经报导了当器件结温分布不均匀时, 用 ΔV_{be}法测得的结温是器件有源区某一点的温度, 流经该点的测试电流密度等于流经整个芯片的平均测试电流密度[19,10]. 在本文中, 我们对用 ΔV_{be}法测得的结温与测试电流的具体关系进行了研究, 给出了合理的理论解释, 并与红外热像图进行了对比.

2　理论分析

假定晶体管有源区出现一稳定热斑, 设热斑的温度为 T_h, 面积为 S_h, 为简单起见, 设有源区其它区域的温度都相等为 T_l, 面积为 S_l, 显然 $T_h > T_l$. 切断加热电流的瞬间给其 BE 结通以测试电流 I_m(通常采用共基极电路, BC 结反偏), 由于热斑的存在将导致流经不同区域的测试电流密度不同, 根据肖克莱(Shockley)方程, 对应于 T_l 和 T_h 处的电流密度分别为

$$J_m(T_h) = BT_h^{\lambda}\exp\left[\frac{q(V_{BE} - V_{go})}{kT_h}\right] \tag{1}$$

$$J_m(T_l) = BT_l^{\lambda}\exp\left[\frac{q(V_{BE} - V_{go})}{kT_l}\right] \tag{2}$$

式中　B 为器件的结构因子, 对于同一个器件, B 为常数; λ 是一个大于 2 的常数[1,2]. (1)/(2) 可得

$$\begin{aligned}\frac{I_m(T_h)}{I_m(T_l)} &= \frac{S_h J_m(T_h)}{S_l J_m(T_l)} \\ &= \frac{S_h}{S_l}\left[\frac{T_h}{T_l}\right]\exp\left[\left[\frac{q(V_{BE} - V_{go})}{k}\right]\left[\frac{1}{T_h} - \frac{1}{T_l}\right]\right] \\ &= \frac{S_h}{S_l}\left[\frac{T_h}{T_l}\right]^{\lambda}\exp\left[\left[\frac{q(V_{go} - V_{BE})}{k}\right]\left[\frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_h}\right]\right]\end{aligned} \tag{3}$$

式中　q 为电子电量; k 为玻尔兹曼常数; $V_{BE} < V_{go}$; $\frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_h} > 0$; 对于稳定热斑, 可以认为 S_h、S_l、T_h 和 T_l 都不随时间变化. 由(3)式可见随 V_{BE}的增大, 指数项减小, 即 $\frac{I_m(T_h)}{I_m(T_c)}$ 减小, 而 V_{BE}的增大也就意味着流经芯片的总的测试电流 I_m 增大. 也就是说随着测试电流 I_m 的增大, 流经热斑区的电流与其它区域的电流的比值趋于减小, 即测试电流趋于均匀化分布. 图 1 给出 T_h= 50℃, T_l= 18℃时, $\frac{I_m(T_h)}{I_m(T_l)}$ 与测试电流的关系.

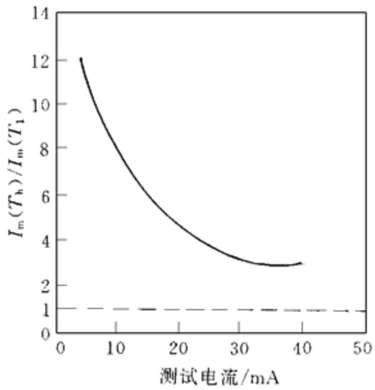


图 1　T_h= 50℃, T_l= 18℃时, $\frac{I_m(T_h)}{I_m(T_l)}$ 与测试电流的关系

FIG. 1　$I_m(T_h)/I_m(T_l)$ Versus I_m at T_h= 50℃ and T_l= 18℃

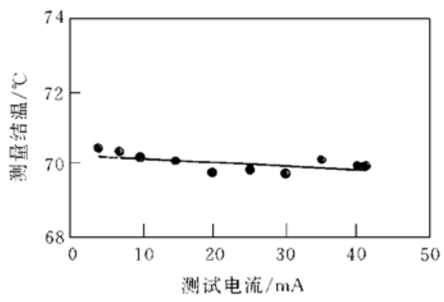
从图 1 可以看出, 当 I_m 较小时, 大部分的 I_m 流过热斑区, 因而此时测出的结温应较接近热斑处的温度 T_h; 随着 I_m 的增加,

$\frac{I_m(T_h)}{I_m(T_c)}$ 逐渐减小,测试电流趋于均匀化分布,因而测量出的结温应逐渐减小.我们把用 ΔV_{BE}法测量所得结温称为视在结温,记作 T_m.即随 I_m 的增加 T_m 减小.当然,对于有源区温度分布均匀的器件从理论上讲 T_m 应不随 I_m 变化.

3　实验与讨论

样品的结电压用 HP-3440/A 型高精度毫伏表测量,测试电流用 HP-34970A 型高精度电流表测量,恒温设备为 QR2 型功率晶体管热阻仪专用油浴恒温槽,测试电流由 QD2 型晶体管恒流源提供.

首先,把样品(3DD9DE)放入恒温槽中,设定恒温槽的温度为 70℃,待充分稳定后用一组不同的测试电流去测量此时器件的结温,结果如图 2 所示.



测试电流/mA

图 2　结温分布均匀时测量结温与测试电流的关系

FIG. 2　Measured Temperature of Junction Versus Measaved Current for Uniform Junction Temperature

从图 2 可以看出,当测试电流 I_m 从 4mA 增大至 40mA 时,测得的结温等于恒温槽的设定温度,与测试电流无关,这与文献[3]、[4]所报道的结果一致,说明测试电流的变化范围选择是合适的.

将样品置于室温环境,施以一定的电加热功率,用红外热像仪观察结温的分布情况,当器件出现稳定热斑时,用变化的测试电流测量此时的结温.图 3 给出电加热功率为 60V×1A 时器件的红外热像图,从图中可以看出在器件有源区已出现一稳定热斑,热斑处的最高温度约为 106℃,比有源区其它部分的温度大约高 10℃.图 4 给出此时的测量结温与测试电流的关系.从图中看出当测试电流为 4mA 时测得的结温为 106.4℃,基本上等于红外热像仪测出的最高结温.随着测试电流增大,测得的结温逐渐降低.当测试电流为 40mA 时测得结温为 102.2℃,与最高结温之差约为 4℃.

图 3　加热功率为 60V×1A 时的红外热像图

FIG. 3　Infrared Thermal Image with Power 60V×1A

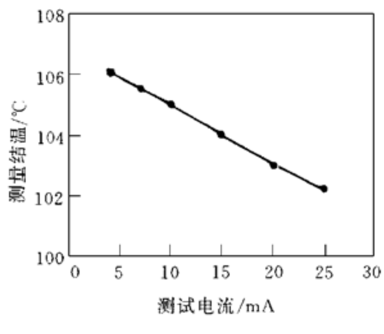


图 4　加热功率为 60V×1A 时测量结温与测试电流的关系

FIG. 4　Measured Junction Temperature Versus Measured Current with Electronic Power 60V×1A

继续增大电加热功率至 64.8V×1A,图 5 给出此时器件的红外热像图,从图中可见器件的结温分布已相当不均匀,热斑的尺寸比原来略有缩小,热斑中心点的温度已高达 253.4℃,比非热斑处的温度高出约 120℃.图 6 给出此时用不同测试电流测得的结温与测试电流的关系,从图中可以看出当测试电流为 4mA 时,测得结温为 202℃,当测试电流为 40mA 时,测得的结温为 185℃,测得结温随测试电流的增大而逐渐

降低,这与前面的理论分析是一致的,最大测得结温之差为 27℃.比较两种不同加热功率下测得结温的变化范围,可以发现当测试电流的变化范围相同时,结温分布越不均匀的器件测得的结温的变化范围越大.

图 5　加热功率为 64.8V × 1A 时的红外热像图

FIG.5　Infrared Thermal Image with Power 64.8V × 1A

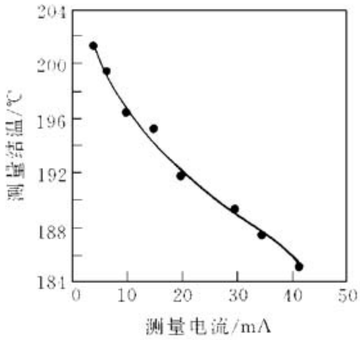


图 6　加热功率为 64.8V × 1A 时测量结温与测试电流的关系

FIG.6　Measared Junction Temperature Versus Measured Current with Power 64.8V × 1A

综上所述,当器件结温分布均匀时用 ΔV_{be}法测得的结温与测试电流无关;当器件出现热斑后,测得结温随测试电流的增大而降低.在相同的测试电流变化范围内,器件结温分布越不均匀,测得结温的变化范围越大.虽然最大测得结温之差与器件实际结温之间的具体数学表达式尚不明了,但有一点是可以肯定的,即用 ΔV_{be}法测得的结温之差一定小于器件的实际最高结温与最低结温之差[7,8].因而在一定程度上可以根据用 ΔV_{be}法测得的结温与测试电流的变化关系来判断器件结温分布的不均匀程度,至少可以判断出器件的结温分布是否均匀,这对于衡量一个双极晶体管的性能优劣有很重要的意义.

4　结论

当双极晶体管结温分布均匀时,用 ΔV_{be}法测得的结温与测试电流的大小无关;当器件出现热斑后,测得结温随测试电流的增大而降低,在相同的测试电流变化范围内,器件结温分布越不均匀,测得结温的变化范围越大.这一现象可用来判断器件的结温分布是否均匀.

参　考　文　献

[1] 高光渤, 半导体学报, 1980, **1**: 298—303 [GAO Guangbo, Chinese Journal of Semiconductors, 1980, **1**: 298—303 (in Chinese)].
[2] 冯士维, 吕长志, 丁广钰, 半导体学报, 1994, **15**(11): 747—753 [FENG Shiwei, Lu Changzhi, Ding Guangyu, Chinese Journal of Semiconductors, 1994, **15**(11): 747—753(in Chinese)].
[3] 冯士维, 谢雪松, 吕长志等, 半导体学报, 1999, **20**(5): 358—364 [FENG Shiwei, XIE Xuesong, Lü Changzhi *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(5): 358—364(in Chinese)].
[4] GB/T 4587—94, "中华人民共和国半导体器件与集成电路标准第 7 部分: 双极型晶体管", 1994 [GB/T 4587—94, Chinese Standards of Semiconductor Devices and IC, Part 7: Bipolar Transistors].
[5] 美军标, MILS-TD-750B, 1970, Part 3131.1[Military Standards of The United States, MIL-STD-750B, 1970, Part 3131.1].
[6] P.L. Hower, D.L. Blackburn, IEEE Power Electronics Conference, 1976, 234—246.
[7] Jan Tauc and Autonin Abraham, Phys. Rev., 1957, **108**(4): 936—937
[8] W.R. Wilcox, 1963, **ED-10**(5): 308—314.
[9] 杨志伟, 苗庆海, 张兴华, 等, 山东大学学报, 1998, **33**(3): 276—281[YANG Zhiwei, MIAO Qinghai, ZHANG Xinghua *et al.*, Journal of Shandong University, 1998, **33**(3): 276—281(in Chinese)].
[10] 杨志伟, 苗庆海, 张兴华, 等, 半导体技术, 1999, **24**(2): 44—46[YANG Zhiwei, MIAO Qinghai, ZHANG Xinghua *et al.*, Semiconductor Technology, 1999, **24**(2): 44—46(in Chinese)].