

* 学术论坛 *

关于国际电工委员会 2000 年版热阻标准 IEC 60747-7 中 ΔV_{BE} 与 I_E 关系的讨论^{*}

苗庆海¹ Yuan Miao² 张德骏¹ 张兴华¹ Lieyong Yang²
陈凤霞³ Zhiwei Yang² 朱阳军¹

1. 山东大学物理与微电子学院, 济南 250100;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore;

3. 中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051

摘要 指出国际电工委员会标准 IEC 747-7 的热阻部分, 关于晶体管电流电压温度关系的原理图和波形图是错误的, 从理论上证明了该标准中的 $I-V-T$ 曲线与实际情况相矛盾, 这一矛盾也被实验所证实; 同时给出了同一晶体管在两个不同温度下正确的 $I-V-T$ 特性曲线和波形图, 可以作为修正标准的参考样本. 还提供了相应的计算和精确的实测结果.

关键词 晶体管 热阻 标准

国际电工委员会标准 IEC 747-7 关于热阻的标准是国际权威标准, 1988 年发布, 1994 和 2000 年又两度被确认并延用至今, 中国国家标准 GB/T 4587-94^[1] 中关于热阻的部分就是照搬的国际电工委员会 IEC 747-7^[2] 的关于热阻的标准, 英国国家标准 BS IEC 60747-7: 2000^[3] 也是套用的国际电工委员会的标准. 本文图 1(a) 示出了 IEC 747-7 的 Figure 23 和 Figure 24, IEC 747-7 的 Figure 23 中的两条曲线是同一只晶体管发射结的 $I-V$ 特性曲线, 右面的一条结温为 $T_j^{(1)}$, 左面的一条结温为 $T_j^{(2)}$, $T_j^{(2)} > T_j^{(1)}$. 图 1(a) 中 Figure 23 的坐标轴上没有刻度, 从坐标轴上看不出是线性坐标系还是对数坐标系, 但是从所给出的 $I-V$ 特性曲线的形状来看, 应当属线性坐标系. 根据图题和 $I-V$ 特性的规律, 横轴应该是发射极-基极的电压 V_{EB} , 刻度也应该是线

性的. 这样, 图 1(a) 中 Figure 23 中的两条曲线之间的水平距离就是 ΔV_{EB} . 图 1(a) 中 Figure 23 是示意图, 示意随着电流的增大, 两条曲线之间的水平距离即越来越大, 两条曲线组合的形态呈张开状.

解读图 1(a) Figure 23, 可以得出这样的结论: 在上述条件下, 与这两个结温对应的发射结电压之差 ΔV_{EB} 随着其正向电流的增加而增大; 反之, ΔV_{EB} 也会随着其正向电流的减小而减小. 这样的结论自然会对我们如何选取测量电流起到引导作用, 在虽然较大的测量电流的自热效应会给测量带来误差, 但是为了提高测量灵敏度和增大测量信号的信噪比, 以增加有效数字位数, 减小测量结果的相对误差, 而必须去尽可能选取较大的测量电流, 这样做的结果是自热效应不能忽略. 图 1(a) IEC 747-7 的 Figure 24 是与 Figure 23 相应的测量热阻时加热电流和测量电流以及发射结电压的波形图, 两图之

2003-11-24 收稿, 2004-03-01 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目 (批准号: 69946001)

© mail: spnj@du.edu.cn, spnj@jr-public.sd.cn.info.net

2199-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

间对照严谨. 但我们通过理论分析和实验结果证明图 1(a) IEC 747-7 的 Figure 23 和 Figure 24 都是错误的. 晶体管的 $I-V-T$ 特性即电流电压温度特性乃是晶体管最基本最重要的物理属性, 这种原理性的错

误对人们具有潜移默化的误导作用. 文中的图 1(a) 是错误的原图, 图 1(b) 是本文作者纠正了原图的错误后画出的图.

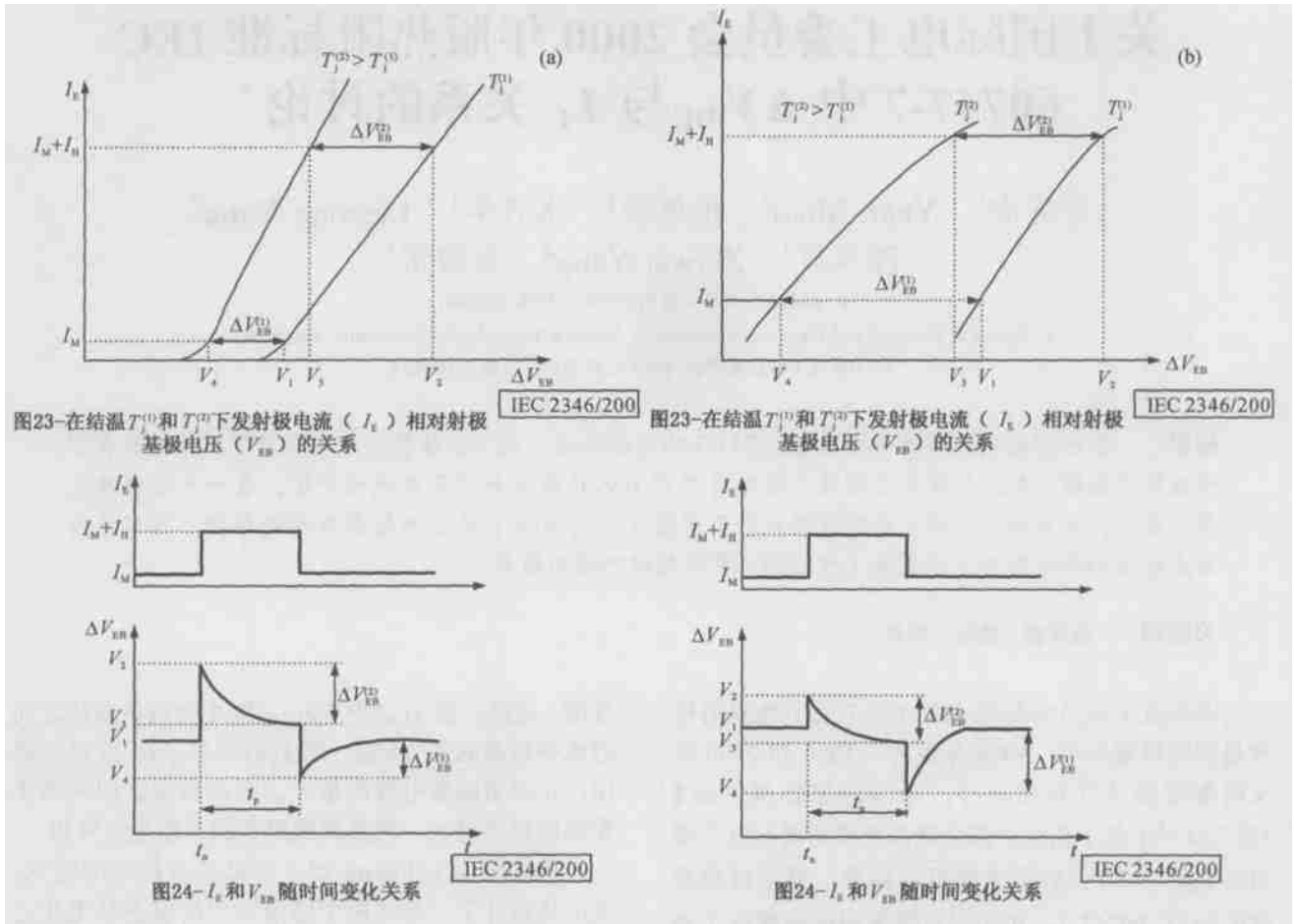


图 1 热阻测量时晶体管的电流电压特性曲线和波形图

(a) IEC 标准中有错的两个图; (b) 本文修正后的图

1 理论上证明 IEC 标准中的 Figure 23 和 Figure 24 有错误

IEC 747-7 的 Figure 23 给出了结温分别为 $T_j^{(1)}$ 和 $T_j^{(2)}$ 时同一晶体管的发射极电流对于发射结电压的两条 $I-V$ 特性曲线, 其 Figure 24 给出了发射极电流、电压的波形图, 见本文图 1(a). 图 1(a) 中的 V_1 和 V_4 是发射极电流为 I_M , 结温分别为 $T_j^{(1)}$, $T_j^{(2)}$ 时的发射结电压, V_2 和 V_3 是发射极电流为 $I_M + I_H$, 结温分别为 $T_j^{(1)}$, $T_j^{(2)}$ 时的发射结电压.

$\Delta V_{EB}^{(1)} = V_1 - V_4$, $\Delta V_{EB}^{(2)} = V_2 - V_3$. 图 1(a) 中两条曲线的形状和位置关系明确显示出 $\Delta V_{EB}^{(1)} > \Delta V_{EB}^{(2)}$. 与 IEC 747-7 的 Figure 23 相对应, 其 Figure 24 中的波形图上也显示了 $\Delta V_{EB}^{(2)} > \Delta V_{EB}^{(1)}$ 的结果. 我们发现这样的结果是错误的. 下面将首先从理论推导方面给出证明, 并给出了正确的 $I-V$ 特性曲线和波形图, 如图 1(b) 所示.

IEC 747-7 测量热阻采用共基极电路, 根据双极型晶体管的 Ebers-Moll 方程, 晶体管的发射极电流和集电极电流分别为

$$I_E = I_{FO} \left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1 \right) - \alpha_R I_{RO} \left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} - 1 \right), \quad (1)$$

$$I_C = \alpha_F I_{FO} \left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1 \right) - I_{RO} \left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} - 1 \right), \quad (2)$$

实用测量条件满足 $V_{CB} < 0$, $e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} \ll 1$,

则 $I_E \approx I_{FO} \left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1 \right) + \alpha_R I_{RO}$,

整理, 得到

$$V_{EB} = \frac{kT}{q} \ln \left(1 + \frac{I_E - \alpha_R I_{RO}}{I_{FO}} \right), \quad (3)$$

对于给定的温度 T_1 和 T_2 , 有

$$V_{EB}(T_1) = \frac{kT_1}{q} \ln \left(1 + \frac{I_E - \alpha_R I_{RO}(T_1)}{I_{FO}(T_1)} \right), \quad (4)$$

$$V_{EB}(T_2) = \frac{kT_2}{q} \ln \left(1 + \frac{I_E - \alpha_R I_{RO}(T_2)}{I_{FO}(T_2)} \right). \quad (5)$$

对于给定的发射极电流 I_E , 当结温分别为 T_1 和 T_2 时, 发射结正向电压 $V_{EB}(T_1)$ 和 $V_{EB}(T_2)$ 的差 ΔV_{EB} 为

$$\begin{aligned} \Delta V_{EB} &= V_{EB}(T_1) - V_{EB}(T_2) = \\ &= \frac{kT_1}{q} \ln \left(1 + \frac{I_E - \alpha_R I_{RO}(T_1)}{I_{FO}(T_1)} \right) - \\ &= \frac{kT_2}{q} \ln \left(1 + \frac{I_E - \alpha_R I_{RO}(T_2)}{I_{FO}(T_2)} \right) = \\ &= \frac{k}{q} \ln \left\{ \frac{I_E - \alpha_R I_{RO}(T_1) + I_{FO}(T_1)}{I_{FO}(T_1)} \right\}^{T_1} - \\ &= \frac{k}{q} \ln \left\{ \frac{I_E - \alpha_R I_{RO}(T_2) + I_{FO}(T_2)}{I_{FO}(T_2)} \right\}^{T_2} = \\ &= \frac{k}{q} \ln \left\{ \left(\frac{I_E - \alpha_R I_{RO}(T_1) + I_{FO}(T_1)}{I_{FO}(T_1)} \right)^{T_1} \times \right. \\ &= \left. \left(\frac{I_{FO}(T_2)}{I_E - \alpha_R I_{RO}(T_2) + I_{FO}(T_2)} \right)^{T_2} \right\} = \\ &= \frac{k}{q} \ln \left\{ \frac{[I_{FO}(T_2)]^{\frac{T_2}{T_1}}}{[I_{FO}(T_1)]^{\frac{T_2}{T_1}}} - \right. \\ &= \left. \ln \left\{ \frac{[I_E - \alpha_R I_{RO}(T_2) + I_{FO}(T_2)]^{\frac{T_2}{T_1}}}{[I_E - \alpha_R I_{RO}(T_1) + I_{FO}(T_1)]^{\frac{T_2}{T_1}}} \right\} \right\}. \quad (6) \end{aligned}$$

当 $I_E > [I_{RO}(T_2) + \alpha_R I_{RO}(T_2)]$, $I_E > [I_{FO}(T_1) - \alpha_R I_{RO}(T_1)]$ 时, 有

$$\Delta V_{EB} \approx \frac{k}{q} \left\{ \ln \left[\frac{[I_{FO}(T_2)]^{\frac{T_2}{T_1}}}{[I_{FO}(T_1)]^{\frac{T_2}{T_1}}} \right] - (T_2 - T_1) \ln I_E \right\}, \quad (7)$$

将 $I_{FO} = -\frac{I_{EBO}}{1 - \alpha_F \alpha_R}$ (式中负号表示 I_{FO} 与 I_{EBO} 方向相反) 代入上式, 得

$$\begin{aligned} \Delta V_{EB} &\approx \frac{k}{q} \left\{ \ln \left[\frac{\left[\frac{-I_{EBO}(T_2)}{1 - \alpha_F \alpha_R} \right]^{\frac{T_2}{T_1}}}{\left[\frac{-I_{EBO}(T_1)}{1 - \alpha_F \alpha_R} \right]^{\frac{T_2}{T_1}}} \right] - (T_2 - T_1) \ln I_E \right\} = \\ &= \frac{k}{q} \left\{ \ln \left[\frac{|I_{EBO}(T_2)|^{\frac{T_2}{T_1}}}{|I_{EBO}(T_1)|^{\frac{T_2}{T_1}}} \right] - \right. \\ &= \left. (T_2 - T_1) \ln(1 - \alpha_F \alpha_R) - (T_2 - T_1) \ln I_E \right\}. \quad (8) \end{aligned}$$

因为 $|I_{EBO}|$ 是正温度系数, 而 $T_2 > T_1$, 故 $|I_{EBO}(T_2)| > |I_{EBO}(T_1)|$.

又因为 $T_2 > T_1$, $I_E > 0$, 故 $(T_2 - T_1) \ln I_E$ 是 I_E 的单调增函数.

所以 $\left[\ln \left[\frac{|I_{EBO}(T_2)|^{\frac{T_2}{T_1}}}{|I_{EBO}(T_1)|^{\frac{T_2}{T_1}}} \right] - (T_2 - T_1) \ln(1 - \alpha_F \alpha_R) - (T_2 - T_1) \ln I_E \right]$ 随着 I_E 的增大而减小, 即 $\Delta V_{EB} = V_{EB}(T_1) - V_{EB}(T_2)$ 随着 I_E 的增大而减小. 所以, $I_E = I_M + I_H$ 时的 $\Delta V_{BE}^{(2)}$ 小于 $I_E = I_M$ 时的 $\Delta V_{BE}^{(1)}$.

上述理论推导说明, 对于实用范围内给定的两个温度 $T_j^{(1)}$ 和 $T_j^{(2)}$, $T_j^{(2)} > T_j^{(1)}$, 低温 $T_j^{(1)}$ 下的发射结电压减去高温 $T_j^{(2)}$ 下的发射结电压之差 $\Delta V_{EB} = V_{EB}(T_1) - V_{EB}(T_2)$, 随着其正向电流的增加而减小, 而不是像图 1(a) Figure 23 所示的那样随着其正向电流的增加而增加.

2 实验证明 IEC 747-7 标准中的 Figure 23 不符合实际

将被测晶体管 3DD15 置于恒温平台上, 达到热平衡后用精度为 0.1°C 的温度计测量晶体管的温度, 首先调控晶体管的温度为 32.5°C 并且恒温. 测试电路为共基极电路, 用 RPY-1 型军用半导体器件可靠性分析仪的数据采集部分采集晶体管发射极的电流电压数据, 该仪器的电流电压测量量程用惠普

34970A 数据采集系统校准. 调控 RPY-1 型军用半导体器件可靠性分析仪的 I_E 恒流源从 0.171 ~ 81.221 mA 加到晶体管的发射极, 脉冲宽度为 60 μ s, 以减小测量电流的自热效应. 用同样的方法和条件采集晶体管温度为 150 $^{\circ}$ C 下的发射极的电流电压数据, 计算出 32.5 $^{\circ}$ C 的发射结电压与 150 $^{\circ}$ C 的发射结电压之差, 绘制成图 2 的曲线. 很容易看出, 发射结电压之差随着发射极电流的增加而减小. 反之, 发射结电压之差随着发射极电流的减小而增大.

图 3 示出了晶体管 3DD15 分别在 $T_j^{(1)} = 32.5^{\circ}$ C 和 $T_j^{(2)} = 150.0^{\circ}$ C 两个不同温度下相应的 $I-V$ 特性曲线, 其中图 3(a) 为线性坐标系, 图 3(b) 为单对数坐标系. 对于温度 $T_j^{(1)} = 32.5^{\circ}$ C 和 $T_j^{(2)} = 150.0^{\circ}$ C, 32.5 $^{\circ}$ C 的发射结电压减去 150.0 $^{\circ}$ C 的发射结电压之差, 在发射极电流 $I_E = 0.614$ mA 时为 279.978 mV, 在 $I_E = 81.8$ mA 时为 208.675 mV, 随着正向电流从

0.14 mA 增加到 81 mA, 发射结电压差减小了 71.03 mV, 而不是像 Figure 23 所示的增加.

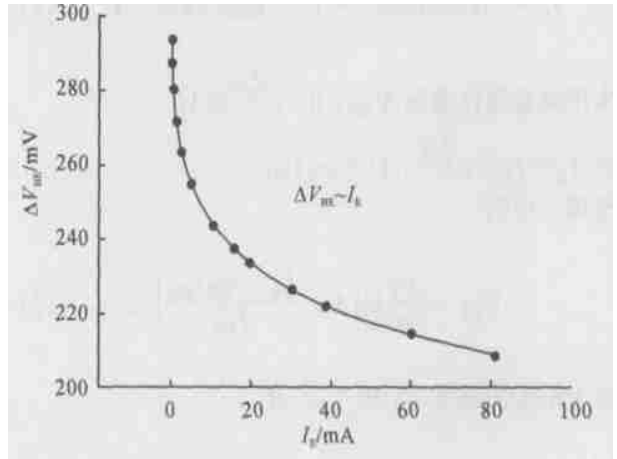


图 2 晶体管 3DD15 的发射结电压之差与发射极电流的关系 (对应温差为 150 ~ 32.5 $^{\circ}$ C)

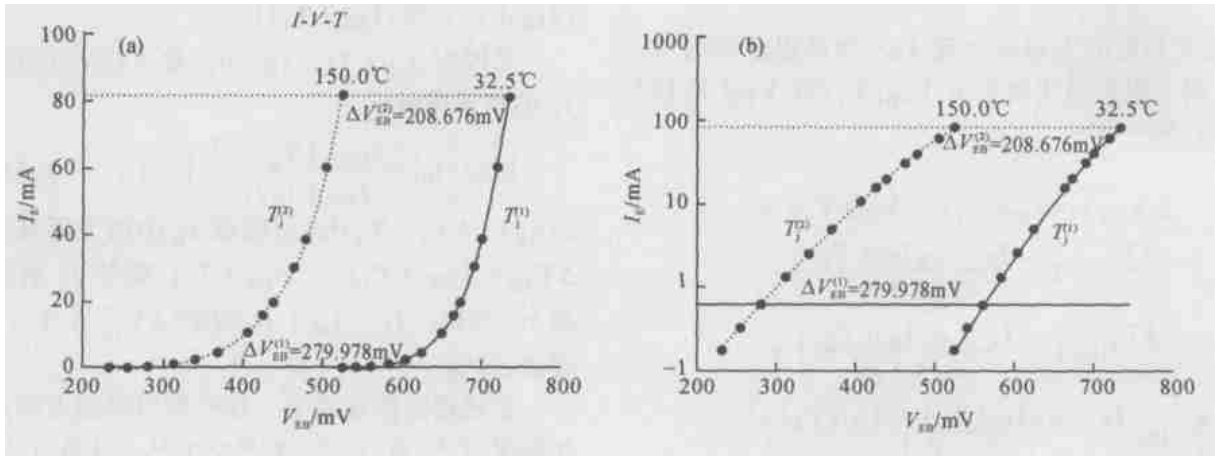


图 3 同一晶体管在两个温度下的电流电压特性曲线 (a) 为线性坐标系; (b) 为单对数坐标系

我们还用上海电工仪器厂生产的 YJ67 型直流标准电压电流发生器提供发射极电流, 用惠普 34970A 数据采集系统采集被测晶体管的发射极电流电压, 测量了国产晶体管 3DD8050, 3DD15, 3DD9, 3DD102, 3DD820 和进口晶体管 2SD820, 2SD850 等大量晶体管, 温度范围从室温到 150 $^{\circ}$ C, 上述规律无一例外.

3 IEC 747-7 的热阻和结温对于测量电流的相关性

热阻的权威标准, 所以普遍称 IEC 747-7 是测量热阻的标准电学方法, 而测量热阻必须以测量结温为前提, 所以 IEC 747-7 也是测量结温的标准电学方法. 在一定的场合下, 用标准电学方法测出的结温也可以称作标准电学结温, 简称之标准结温. 此电学方法最重要的测量条件是测试中所使用的测量电流, 热阻和结温对于测量电流的相关性与可信度就是一个不容回避的问题.

用 RPY-1 型军用半导体器件可靠性分析仪与 QFI InfraScope II 型红外热像仪联机试验, 即把被测晶体管禁锢在 QFI InfraScope II 的测试平台上,

由于 IEC 747-7 是国际公认的用电学方法测量

用 RPY-1 型军用半导体器件可靠性分析仪对晶体管施加偏置功率并且采集发射结的电流电压数据, 同时 QFI InfraScope II 摄取被测晶体管芯片的红外热像图, 热像图示于图 4. 图 4 显示的是被测晶体管 3DD102-33 的热像图, 加热条件为: 40 V 1.25 A 500S. QFI InfraScope II 的测量结果是峰值结温为 193.66°C , 而 RPY-1 型军用半导体器件可靠性分析仪用 1.25 mA 测量电流按标准电学方法计算出的标准结温为 148.96°C , 用 10 mA 测量电流按标准电学方法计算出的标准结温为 146.04°C . 标准电学方法用 1.25 mA 测量电流测出的结温比红外热像仪的测量结果低了 44.7°C , 用 10 mA 测量电流测出的结温比红外热像仪低了 47.62°C . QFI InfraScope II 的测量结果的可信度经过核对不可能有这样大的误差, 比标准电学方法可信, 因为标准电学方法的前提和理论基础是结温均匀, 图 4 是结温不均匀的情况. 从所作的大量红外热像图来看, 晶体管自加热时其结温分布一般都是不均匀的, 即标准电学方法在一般情况下都是不适用的, 这在理论上也很容易解释. 因此, 标准电学方法计算出来的结果偏离实际结温是必然的. RPY-1 型军用半导体器件可靠性分析仪的测量结果是符合标准电学方法的, 标准电学方法的测量电路和计算方法都非常简单, 套用标准电学方法也是很容易办到的. 在我们承担的多项国



图 4 晶体管 3DD102-33 的热像图

加热条件为: 40 V 1.25 A 500S

家科研项目中, 用上述联机试验的方法测量了许多晶体管, 情况和结果都相似. BJ2984 型晶体管热阻仪是北京无线电仪器厂按照标准电学方法设计生产的测量晶体管热阻的专用仪器, 在中国应用面很广, 是中国关于热阻测量的二级标准所使用的测量仪器. 我们用 BJ2984 型晶体管热阻仪与 QFI InfraScope II 也进行了上述方法的联机实验, 与用 RPY-1 型军用半导体器件可靠性分析仪联机实验的结果类同.

如前所述, 根据 IEC 747-7 中 Figure 23 的导向, 测量电流应该尽可能大, 而根据本文的理论推导和图 2, 3 所示的实验结果, 为了提高测量灵敏度和增大测量信号的信噪比, 以增加有效数字位数减小测量结果的相对误差, 测量电流应该尽可能小. 根据标准电学方法与红外热像仪联机实验的结果, 减小测量电流, 标准电学方法测出的结温会趋向于红外法测量的结温, 1.25 mA 比 10 mA 的测量电流测出的结温高了 2.92°C , 如果测量电流的差距进一步拉大, 特别是尽可能减小测量电流, 这个结温差距还会进一步扩大. 而中国机械电子工业部发布的壳额定功率晶体管测量热阻的条件是测量电流为 5, 10 和 30 mA, BJ2984 热阻仪设定的测量电流为 10 mA. 从本文的分析来看, 这样的测量电流都偏大了, 这很难排除 IEC 747-7 中 Figure 23 导向的影响.

4 讨论和结论

(1) IEC 747-7 中的 Figure 23 是画错了, 不过参看本文图 3(a), 即使用正确的数据在线性坐标系绘制晶体管的 $I-V-T$ 曲线簇, 也很难发现不同温度下的发射结电压之差与发射极电流的相关性. 本文用单对数坐标系, 不用示意图, 直接用实测数据制图就可以明确地表示这一规律, 如本文图 1(b) 所示.

(2) 虽然 IEC 747-7 中热阻的计算公式没有受到其 Figure 23 的影响, 但是用标准电学方法测出的标准结温在一定的条件下远远低于实际结温, 说明 IEC 747-7 中热阻的计算公式存在着深层次的学术和技术问题, 其原因之一是没有给出选取测量电流的原则, 而实用中测量电流普遍选取的偏大, 因而会造成难以迁就的误差. IEC 747-7 承认, “请注意,

此测量方法作了这样的假设: 当晶体管耗散功率时, 结温分布是均匀的, 并且与校准晶体管时的温度相同. 这个假设可能是不成立的.” 在考虑到反向电流的前提下尽可能减小测量电流是扩大权威标准适用范围的可行方法. 关于 IEC 747-7 中热阻测量中的测量电路、测试方法、测量原理、计算公式中存在的深层次问题, 我们已经做了一定的研究, 将另文提出.

(3) IEC 747-7 中这种原理性的错误对人们具有潜移默化的误导作用, 是标准的瑕疵, 发布 15 年来一直沿用至今是电子和电器工程领域的一个缺憾. 建议国际电工委员会参考本文的分析和论述修改该错误. 中国关于热阻测量的国家标准 GB/T 4587-94^[1] 是中国国家技术监督局发布实施的, 希望中国国家技术监督局参考本文的分析和论述, 在世界上率先提出修改热阻测量标准的版本, 并且致函

国际电工委员会, 建议国际电工委员会改正失误.

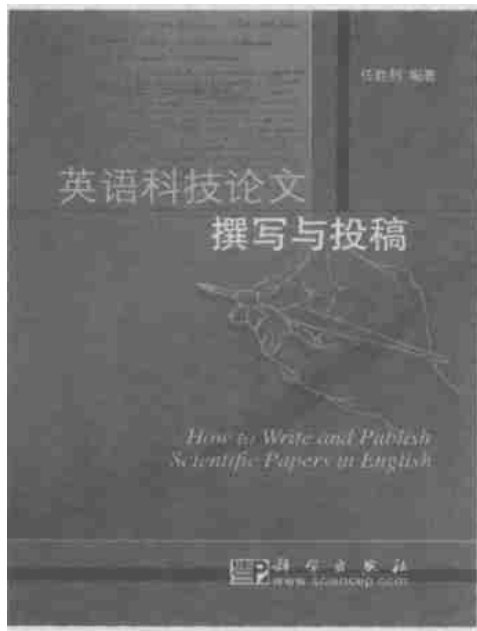
致谢 中国国家半导体器件质量监督检验中心主任徐立生教授进行了复核本文实验的工作, 他采用从美国进口的宇航级晶体管和国产晶体管分别进行实验, 证明不同温度引起的发射结电压的差值在小电流时大, 大电流时小, 与本文的结论完全一致; 中国电子科技集团公司第十三研究所曹[■]工程师帮助本文摄取了红外热像图, 在此一并致谢.

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国国家标准 GB/T 4587-94 IEC 747-7 1988 半导体分立器件和集成电路第七部分: 双极型晶体管, 1996. 50~59
- 2 International Electro-technical Commission, "International Standard", Ceiec 747-7, 1988. 133~145
- 3 British Standard Bs IEC 60747-7: 2000 Semiconductor devices-Part 7: Bipolar transistors, 2001. 68~80

《英语科技论文撰写与投稿》 任胜利 编著

科学出版社 定价: 28.00 元



本书是科技论文写作与投稿的指南读物. 书中全方位地分析和展示了科技论文写作的技巧与诀窍, 从论文选题、拟投稿期刊的选择及作者署名与分工等方面阐述了科技论文写作前的准备工作, 通过大量的实例分析介绍了论文题名和摘要撰写中应遵循的基本原则——准确(Accuracy)、简洁(Brevity)和清楚(Clarity), 分别从写作技巧、时态和语态的使用等角度介绍了科技论文正文各部分(引言、材料与方法、研究结果、讨论、结论)的撰写, 举例说明了致谢的写作要点及图表制作的注意事项, 总结了各主要参考文献体例的特点、格式及相关著录规范.

本书还较为全面地介绍了国际单位制(SI)及其使用中应注意的问题, 结合实例举证从选词、重要语法和文体等方面系统阐述了科技英语写作的文法与表达, 较为详尽地总结了英文标点符号的使用, 从稿件录排、投稿信写作、校样改正等方面阐述了如何投稿及与编辑联系, 综述了作者、编辑和审稿人在同行评议过程中的交流与互动.

本书可作为理工科研究生的教学用书或自学教材; 也可供科研人员和科技编辑的案头查阅和浏览.

联系方式: 北京双清路 83 号 科学基金杂志社 (电话: 010-62327204; 联系人: 程宇 刘俐)