

双极晶体管 V_{BE} 瞬态热阻测试法精度修正*

李霁红 贾颖 康锐 高成

(北京航空航天大学工程系统工程系, 北京 100083)

摘要: 对双极型晶体管 V_{BE} 瞬态热阻测试法中晶体管壳温波动和测量延迟时间的误差进行了分析, 提出了提高测试精度的误差修正方法. 以 3DK457(F0 金属封装) 双极晶体管为实验对象进行了研究, 结果表明: 晶体管瞬态热阻 V_{BE} 修正测试方法与红外扫描热像法和标准电学法相比较在保持较高测量精度的前提下, 测试成本低, 测量效率高.

关键词: 双极晶体管; 瞬态热阻; 试验方法

PACC: 7220P; 7330; 7340P

中图分类号: TN321

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)05-1010-05

1 引言

瞬态热阻可以反映芯片、焊接层和管壳的烧结或粘结等质量问题, 瞬态热阻特性对半导体器件的可靠性有着至关重要的影响. 因此, 瞬态热阻测试的准确性十分重要, 与之相关的测试方法研究也倍受重视. 目前, 瞬态热阻测试最常用的方法是红外扫描热像法和电学法^[1]. 红外扫描热像法可以精确地测量器件的结温、结温分布和热阻参数, 有助于在设计研制阶段采取纠正措施, 提高器件的使用寿命, 也可用于高可靠性器件的筛选. 但是红外扫描设备结构复杂、成本高、测试效率低, 而且只能对芯片表面直接测量, 因此对实际器件成品的考核不能满足需求^[2]. 电学法^[3]利用晶体管温敏参数与瞬态热阻在一定条件下满足某种数学关系式, 通过测量晶体管温敏参数间接地测试瞬态热阻参数. 电学测量法具有测量效率高、成本低、对器件无损伤等优点. 为此国外已研制出原理性的电学法热阻测试仪器, 用于一般热阻的测量. 但是晶体管热特性具有复杂、敏感及不稳定的特点, 而电学测试方法由于自身存在一定局限性等问题, 与红外扫描热像法相比其测量结

果精度不高^[3]. 因此, 本文首先对电学法测量瞬态热阻原理和误差进行了理论分析, 找出产生测量误差的主要原因. 在试验研究基础上, 提出了通过采用误差修正措施提高瞬态热阻测量精度的改进电学法. 最后给出了误差修正数学表达式, 并以实验数据进行了验证.

2 电学法测量瞬态热阻原理及误差分析

瞬态热阻是指器件在脉冲工作状态下的热阻. 脉冲作用下的瞬态热阻定义为最大结温升与耗散功率脉冲幅值之比. 对功率晶体管通常以壳温作为温度参考点, 其表达式为:

$$j_c = T_j / P_H = (T_j - T_c) / P_H \quad (1)$$

其中 T_j 为芯片结温; T_c 为壳温; P_H 为施加的脉冲功率. 瞬态热阻测量归结为对脉冲功耗 P_H 、壳温 T_c 及结温 T_j 的测量. 显然, 双极晶体管的结温 T_j 无法进行直接测量. 为此, 电学法利用发射结的正向压降 V_{BE} 与结温 T_j 在相当宽的范围内 ($0 \sim 200$) 呈线性关系^[4-8], 通过对 V_{BE} 的测量间接地测量结温 T_j . 关系式为:

* 军用电子元器件科研项目 (批准号: 0310 GK0002)

李霁红 女, 1965 年出生, 副研究员, 博士研究生, 从事半导体物理和器件的相关项目研究. Email: miaoruo38@163.com

2004-08-08 收到, 2004-10-13 定稿

$$V_{BE}(T_j) = M \times T_j = V_{BE}(T_a) - V_{BE}(T_j) \tag{2}$$

式中 M 为温敏系数,是与温度 T 基本无关的负常数; $V_{BE}(T_a)$, $V_{BE}(T_j)$ 分别为加脉冲功率前、后的温敏参数值.由(1)和(2)式得到瞬态热阻与温敏参数 V_{BE} 关系表达式:

$$j_C = \left| \frac{V_{BE}(T_j)}{P_H M} \right| \tag{3}$$

公式(3)为电学法测量瞬态热阻的基本原理:在一定条件下,器件从结到外壳的热阻 j_C 和 V_{BE} 成正比关系.图 1 所示为单脉冲测量双极晶体管瞬态热阻时序^[9].图中 t_H 为加热功率持续时间; t_{ms} 为温敏参数的测试时间; t_d 为加热脉冲切断后测量 $V_{BE}(T_j)$ 的延迟时间.

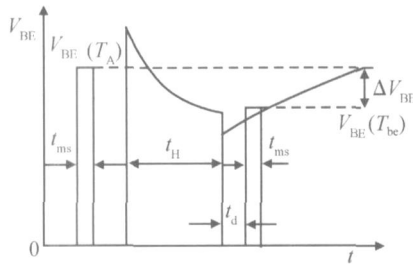


图 1 单脉冲测量瞬态热阻时序

Fig. 1 Cycle time diagram of single pulse test transient thermal resistance

由图 1 可知,加脉冲功率前 $V_{BE}(T_a)$ 等于环境温度 T_a 下的 V_{BE} .在施加脉冲功率后,随着加热功率时间 t_H 的增长,被测器件结温升高,同时 V_{BE} 随之下降;当脉冲功率结束时,结温达到最大值 T_j , V_{BE} 也降至最低点 $V_{BE}(T_j)$;当脉冲功率结束后,结温随之下降, V_{BE} 逐渐增大,最终将趋近于 $V_{BE}(T_a)$.显然,加脉冲功率前 $V_{BE}(T_a)$ 可以准确地测量,而脉冲功率结束时 $V_{BE}(T_j)$ 的实际值无法测量.这是由于晶体管 p-n 结上电荷变换时间、施加测试电流脉冲转换开关时间以及加热脉冲的后沿和测试脉冲前沿的影响,使得 $V_{BE}(T_j)$ 的测量数据实际是加热脉冲功率终止经过一段延迟时间 t_d 后的测量结果.显然这个数据与加热脉冲功率终止时刻实际 $V_{BE}(T_j, t_d = 0)$ 数据存在误差,这是影响瞬态热阻测试精度的重要因素.此外,壳温 T_C 作为温度基准点,需要

保持恒定,即 $T_C = 0$,但是,在测试过程中壳温恒定条件难以达到.因此壳温波动引起 $V_{BE}(T_j)$ 测量误差,也是影响瞬态热阻测试精度不可忽视的一个因素.

3 试验

3.1 试验方案

图 2 所示为瞬态热阻测试原理框图.各部分功能如下:热阻测试系统为晶体管提供工作电压 V_{CB} ,加热电流脉冲信号 I_E ,测量电流脉冲信号 I_{ms} 及延迟时间脉冲信号 t_d ;温敏参数测量系统对晶体管温敏参数信号 V_{BE} 进行采样和模/数转换,并将数据送入微机系统;温度测试仪测量晶体管壳温 T_C 信号,并送入微机系统;微机测试系统对测量的温敏参数和壳温参数进行处理,按照程序计算瞬态热阻值和完成误差的修正;可控恒温箱为晶体管提供可控的恒定壳温环境;散热系统为样管提供散热条件.

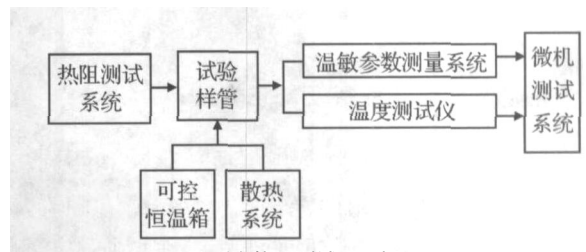


图 2 瞬态热阻测试原理框图

Fig. 2 Principle frame diagram of transient thermal resistance test

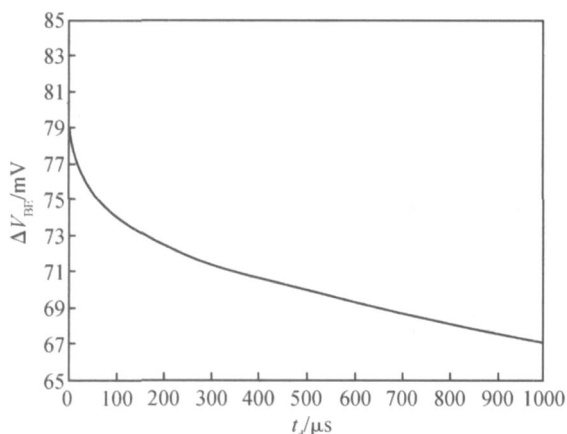
3.2 试验数据

试验选择 12 支 3D K457 (F0) 功率晶体管进行瞬态热阻测量.为分别研究测量延迟时间和壳温变化对瞬态热阻值的影响及修正方法,试验分为两组进行.在晶体管安全工作区范围内设置测试条件为: $V_{CB} = 20V$, $I_E = 0.5A$, $I_{ms} = 10mA$.第 1 组试验保持测量延迟时间不变,设置 $t_d = 50\mu s$,在 $1 \sim 9000ms$ 范围内改变功率持续时间 t_H 值,记录管壳的温度变化 T_C 和温敏参数 V_{BE} 的值;第 2 组试验保持加热功率持续时间不变,设置 $t_H = 1s$,在 $10 \sim 999\mu s$ 范围内改变脉冲测量延迟时间 t_d 值,记录温敏参数 V_{BE} 的值.

两组试验数据结果如表 1 和图 3 所示.

表 1 3DK457 晶体管 V_{BE-T_H} 平均统计数据Table 1 V_{BE-T_H} test data average statistics form of 3DK457 sample

t_H/ms	1	10	50	100	200	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
$T_C/$	0.0	0.0	0.2	0.5	1.0	2.7	4.7	8.2	10.1	11.1	12.1	12.7	13.4	13.7
V_{BE}/mV	8.7	21.8	33.7	40.3	48.7	63.3	76.1	88.5	93.5	97.2	98.8	99.9	101.1	101.4

图 3 $V_{BE}-t_d$ 关系图Fig. 3 $V_{BE}-t_d$ relation

4 数据分析及误差修正方法

4.1 壳温波动误差分析及修正方法

V_{BE-T_H} 关系曲线是反映包括单脉冲和不同占空比的重复脉冲的一组曲线,曲线反映 V_{BE} 随着加热功率持续时间 t_H 增长近似地呈线性增加并逐渐趋于稳态值.表 1 数据显示, T_C 在试验过程中未达到壳温恒定的要求.当施加功率时间较短时($t_H < 1s$),由于管壳的热容量远大于结的热容量(一般为数百倍至数千倍),可以认为管壳的温度几乎没有上升,即 $T_C = 0$;但是当 t_H 时间加长,由于散热器热阻的温升使管壳温度比环境温度明显上升,当 $t_H > 1s$, $T_C = 5$,引起 V_{BE} 测量值明显增大, J_C 计算结果也将比实际值偏大.因此,误差修正方法是将 V_{BE} 测量值减去壳温波动引起 V_{BE} 值增加部分,如公式(4)所示,

$$V_{BE\text{修正}} = V_{BE} - T_C \times M \quad (4)$$

4.2 延迟时间误差分析及修正方法

图 3 为典型的器件冷却曲线,随着延迟时间 t_d 增加, V_{BE} 下降幅度增大.当 $t_d = 50\mu s$ 和 $t_d = 0$ 时, V_{BE} 相差近 2.8mV,故 $t_d = 50\mu s$ 时, V_{BE} 下降了约 3.5%,瞬态热阻值也比实际值减小约 14%,这使得

t_d 成为瞬态热阻测试中不可忽略的重要误差源.由于芯片冷却时呈指数特性,故 $V_{BE}-t_d$ 在单对数坐标上呈一直线,可以用多点外推法或采用数学拟合等方法推算得到 $t_d = 0$ 时的 $V_{BE}(T_j)$ 值来修正测量结果^[9].

本试验采用 t_d 外推法对误差进行修正,通过 V_{BE} 外推法得到加热脉冲功率切断时,即延迟时间 $t_d = 0$ 时的温度敏感参数值,如公式(5)所示,

$$V_{BE}(T_j, t_d = 0) = V_{BE}(t_{d1}) + [V_{BE}(t_{d2}) - V_{BE}(t_{d1})] t_{d1}^{1/2} / (t_{d1}^{1/2} - t_{d2}^{1/2}) \quad (5)$$

式中 $V_{BE}(T_j, t_d = 0)$ 为外推到加热脉冲功率切断时即延迟时间 $t_d = 0$ 时的温度敏感参数值; $V_{BE}(t_{d1})$ 为 $t_d = t_{d1}$ 时刻测得的温度敏感参数值; $V_{BE}(t_{d2})$ 为 $t_d = t_{d2} > t_{d1}$ 时刻测得的温度敏感参数值; $V_{BE}(t_{d1}, t_{d2})$ 是在 $V_{BE}(t_d)-t_d^{1/2}$ 曲线的第一个线性段.

由图 3 容易计算出外推因子 h .

$$h = V_{BE}(T_j, t_d = 0) / V_{BE}(T_j, t_d = t_d) \quad (6)$$

以延迟时间 $t_d = 50\mu s$ 为例, $V_{BE}(T_j, t_d = 50\mu s)$ 值将比延迟时间 $t_d = 0$ 时的 $V_{BE}(T_j, t_d = 0)$ 偏小约 5%.

4.3 壳温波动和延迟时间误差综合修正方法

由公式(4)~(6)可以推导出瞬态热阻壳温波动和延迟时间误差综合修正公式:

$$j_C\text{-修正} = h V_{BE}(T_j) / M V_{BC} I_E - T_C / V_{BC} I_E \quad (7)$$

本试验在 $V_{BC} = 20V$, $I_E = 0.5A$, $I_{ms} = 10mA$, $t_H = 1.00s$ 和 $t_d = 50\mu s$ 测试条件下,对 3DK457 型晶体管样管进行壳温波动和延迟时间误差综合修正瞬态热阻测试试验,其中 $M = -2.0mV/$, $h = 0.95$. 测试数据如表 2 所示.

从壳温和延迟时间误差修正前、后瞬态热阻数据看,修正后比修正前瞬态热阻减小,平均修正误差为 0.64 / W.

表 2 3DK457 型晶体管的壳温和延迟时间误差瞬态热阻修正数据

Table 2 Transient thermal resistance test correction of data of 3DK457 transistor

管号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12	平均
修正前 J_C	3.80	—	3.95	3.75	3.70	3.85	3.70	3.75	3.85	3.85	3.75	3.80	3.79
修正后 J_C	3.25	—	3.38	3.02	2.87	3.21	3.02	3.05	3.19	3.11	3.18	3.32	3.15

5 结论

本文对 V_{BE} 电学法测量双极晶体管瞬态热阻误差进行了分析,确定了壳温波动和测量延迟时间误差是影响测量精度的主要原因.壳温升高使瞬态热阻测量值比实际值增大,延迟时间造成瞬态热阻测量值比实际值减小.本文给出了误差综合修正方法.研究表明,通过采用壳温波动和延迟时间误差综合修正方法可以有效地降低晶体管温敏参数 V_{BE} 的测量误差,从而提高瞬态热阻测量精度.与红外扫描热像法和标准电学法相比,在保持较高测量精度前提下,本文所述的误差综合修正方法测试成本低、效率高.

致谢 感谢国营 873 厂给予的支持和帮助.

参考文献

[1] Webb P W. Measurement of thermal resistance using electrical methods. IEEE Proc ,1987 ,34 :51
 [2] Feng Shiwei ,Xie Xuesong ,L ü Changzhi et ,al. Measurement and analysis of thermal features of semiconductor device by the method of electricity. Chinese Journal of Semiconductors , 1999 ,20(5) :359(in Chinese) [冯士维,谢雪松,吕长志,等.半导体器件热特性的电学法测量与分析.半导体学报,1999,20

(5) :359]
 [3] Huang Luoguang , Cui Enlu , Qing Zhongbo , et al. Measurement of power transistor thermal resistance by the method of infrared scanning thermograph. Semiconductor Technology , 1998 ,23(2) :43(in Chinese) [黄雒光,崔恩录,秦仲波,等.用红外扫描法测量功率晶体管热阻.半导体技术,1998,23(2) : 43]
 [4] Military Standards of the United States , MIL-STD-750D , 1983 ,Part 3131. 1 [美军标,MIL-STD-750D,1983,3131. 1]
 [5] Military Standards of the United States , MIL-STD-883C , 1997 ,Part 1012. 1 [美军标,MIL-STD-883C,1997,方法 1012. 1]
 [6] GB/ T4587-94 , Chinese Standards of Semiconductor Devices and IC ,Part7 :Bipolar Transistors ,1994 [GB/ T 4587-97 ,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]
 [7] Dawson D E , Gupta A K , Salib M L. CW measurement of HBT thermal resistance. IEEE Trans Electron Devices ,1992 , 39(10) :2235
 [8] Fields C H , Foschaar J , Thomas S . Thermal resistance characterization of 200 GHz f_t / InGaAs/ InAlAs HBTs. Indium Phosphide and Related Materials Conference ,2002 :79
 [9] Jia Songliang ,Deng Zhihong ,Li Mingyi ,et al. Influence of delay time for test of dynamic thermal resistance of semiconductor device. The Sixth Scholarship Annual Convention Theory Collection of Essays of Chinese Electronics Institute , Guiyang ,1992 [贾松良,邓志宏,李明义,等.延迟时间对半导体器件瞬态热阻测量的影响.中国电子学会第六届学术年会论文集,贵阳,1992]

Accuracy Correction of Transient Thermal Resistance Test of Bipolar Transistors via Method of V_{be} *

Li Jihong, Jia Ying, Kang Rui, and Gao Cheng

(Department of System Engineering of Engineering Technology, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: A new method of accuracy correction is presented for improving the measurement accuracy of V_{be} of a bipolar transistor in testing its transient thermal resistance. The method is based on the analysis of errors induced by the case temperature fluctuation and the measurement time delay. A bipolar transistor of the type of 3DK457 (with FO metal-pack) is taken as an example. It shows that, compared with the method of infrared scanning thermograph and standard electricity, the method proposed here for V_{be} correction of bipolar transistors features low measurement costs and high measurement efficiency while maintains high measurement accuracy.

Key words: bipolar transistors; transient thermal resistance; test methods

PACC: 7220P; 7330; 7340P

Article ID: 0253-4177(2005)05-1010-05

* Project supported by Military Electronic Device Science Foundation (No. 0310 GK0002)

Li Jihong female, was born in 1965, PhD candidate. She is engaging in semiconductor physics and semiconductor device physics. Email: miaoruo38@163.com

Received 8 August 2004, revised manuscript received 13 October 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics