

高效在线测量加速实验中双极晶体管结温方法的研究

郭春生 丁嫣 姜泊洋 廖之恒 苏雅 冯士维

High-efficiency on-line measurement of junction temperature based on bipolar transistors in accelerated experiment

Guo Chun-Sheng Ding Yan Jiang Bo-Yang Liao Zhi-Heng Su Ya Feng Shi-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 224703 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.224703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.224703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

瞬态大电流测量结温中校温曲线弯曲现象的研究

Bending phenomenon of temperature calibration curve in junction temperature measurement by the high transient current

物理学报.2015, 64(18): 184704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184704>

锗硅异质结双极晶体管单粒子效应加固设计与仿真

Simulation and design of single event effect radiation hardening for SiGe heterojunction bipolar transistor

物理学报.2015, 64(11): 118502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.118502>

沟槽型发射极 SiGe 异质结双极化晶体管新结构研究

Research on SiGe heterojunction bipolar transistor with a trench-type emitter

物理学报.2014, 63(14): 148503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.148503>

超结硅锗碳异质结双极晶体管机理研究与特性分析优化

Mechanism and characteristic analysis and optimization of SiGeC heterojunction bipolar transistor with super junction

物理学报.2014, 63(4): 048501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.048501>

三维燃烧介质和壁面温度的非接触联合重建研究

Research on simultaneous reconstruction of the temperature distribution of a 3D participating medium and its boundary

物理学报.2012, 61(13): 134702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.134702>

高效在线测量加速实验中双极晶体管结温方法的研究*

郭春生[†] 丁嫣 姜舶洋 廖之恒 苏雅 冯士维

(北京工业大学信息学部电子科学与技术学院, 北京 100124)

(2017年2月23日收到; 2017年8月20日收到修改稿)

针对晶体管在加速寿命实验和老炼实验等实际工程中结温的在线测控问题, 本文基于大电流电学测温方法研究了型号为2N3055的双极大功率晶体管在恒定的集电极电压 V_{ce} 和集电极电流 I_{ce} 条件下发射结电压 V_{be} 随着温度 T 变化的对应关系. 研究表明, 温度在40—140 °C范围内时, 在集电极加载大功率电流电压的条件下, 发射结电压随温度上升而线性减小, 基极电流随温度变化不超过4%. 通过理论推导恒定功率下发射结电压与温度的数学模型, 证明了当基极电流数值随温度变化不超过4%时, V_{be} - T 关系曲线呈线性且理论上引起的温度误差不超过0.5 °C, 以此为基础推导出一种新的在线测量加速实验中结温测试公式. 最后利用Phase11进行对比验证实验, 证明了该方法的正确性.

关键词: 功率器件, 结温, 电学法, 在线监控

PACS: 47.80.Fg, 85.30.Pq, 85.30.-z, 84.37.+q

DOI: 10.7498/aps.66.224703

1 引言

随着半导体器件在军事、航天、工业等方面的广泛应用, 对半导体器件的可靠性要求越来越高. 在实际应用中, 加速寿命实验和老炼实验是常用的预测器件寿命和检测器件优劣的实验方法, 在国内外具有广泛的应用^[1-3]. 现行实验过程中, 结温通常利用线下测温法获得, 即通过测量的恒定热阻计算得到加速实验中的结温. 然而, 该线下法测量结温会引入较大误差: 1) 热阻是温度的函数, 材料热导率变化100 °C时引入的热阻变化达到20%^[4]; 2) 线下测温方法中器件与散热器之间的接触热阻并未考虑, 而接触热阻通常是不可忽略的^[5]. 并且, 李霁红等^[6]提出, 由于器件生产工艺等因素的限制, 实验过程中结温往往并不恒定. 根据阿伦尼斯模型推断, 温度每上升10 °C, 器件寿命就下降约一半, 所以结温的准确与否直接关乎预测结果的准确度.

为解决线下测温的问题, 通常利用在线测温法. 现行的在线测温法通常利用温度敏感参数与结温的对应关系^[7], 通过测量校温曲线的方式构建校温曲线库, 从而做到对结温的在线测量^[8-12]. Baker等^[13]对绝缘栅双极型晶体管器件利用峰值栅电流和温度的对应关系构建校温曲线, 从而达到测量结温的目的. Munk-Nielsen等对金属氧化物半导体器件的峰值电流和温度的对应关系进行了研究, 做出了相应的校温曲线以完成对结温的测量^[14]. 国内有朱阳军等^[15]利用校温曲线对双极晶体管的结温进行了在线测量的研究.

以上研究均对结温的在线测温问题做出了有益的探索, 但是现有方法中均需要先测量得到校温曲线库, 校温曲线库通常包括十几条校温曲线, 一条校温曲线往往需要测量数个甚至十数个参考点才可以得到, 并且需要利用软件进行拟合绘制, 校温曲线的测量需要专门的设备, 成本高且严重影响效率, 不利于工程上的实际应用. 针对加速实验和

* 北京市教委基金(批准号: KM201510005008)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: guocs@bjut.edu.cn

老炼实验等工程上的实际应用, 为简化校温曲线的测量过程, 避免复杂的数据处理及拟合绘制过程, 本文以双极型晶体管为例, 在电压 V_{ce} 和电流 I_{ce} 恒定的条件下对结电压 V_{be} 随着温度 T 的变化关系进行了研究; 分析发现以室温下 I_{be} 的数值为参考点, 当 I_{be} 的数值随温度变化不超过 4% 时, 理论上引起的温度误差不超过 0.5 °C. 在此理论上推导得到的 V_{be} - T 的数学模型, 证明 V_{be} - T 曲线存在线性关系, 并通过校温实验证明了线性关系的准确性.

由 V_{be} - T 的数学模型提出了一个新的测试公式: 在电压 V_{ce} 和电流 I_{ce} 恒定的条件下测量得到一个参考点的基础上, 只需在线测量出结电压 V_{be} , 代入公式即可快速计算出结温. 该方法简化了复杂的数据处理过程和绘图制表步骤, 一条校温曲线只需测量任意一参考点即可得到, 提高了工程应用的效率, 实现了对结温在线监控的目的.

2 实验及校温曲线

2.1 实验及所得数据图像

为了方便利于加速寿命实验和老炼实验等某些实际工程上的应用, 本文基于电学测温方法测量并给出了集电极电压 V_{ce} 和集电极电流 I_{ce} 恒定时发射结电压 V_{be} 和温度 T 的关系曲线.

将型号为 2N3055 的双极大功率晶体管放在温箱里, 引脚外接半导体精密测试仪 AgilentB 1500 A, 分别设定温度为 40, 60, 80, 100, 120, 140 °C, 待温度稳定后, 可认为此时结温即为温箱设定温度. 实验中晶体管采用共射极接法: 集电极加 20 V 电压, 发射极接地, 基极分别加脉冲电流 50 μ A—13.15 mA, 电流步长 50 μ A, 脉宽 500 μ s, 周期 1 ms, 以避免自升温对实验的影响. 测量相同电流 I_{ce} 条件下基极电流 I_{be} 结果如表 1 所列, 发射结电压 V_{be} 如图 1 所示.

表 1 基极电流 I_{be} 数值与温度对应关系

Table 1. Base current I_{be} value and temperature correspondence.

I_{ce}/mA	$T/^{\circ}\text{C}$					
	40	60	80	100	120	140
100	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.4
200	2.8	2.78	2.76	2.74	2.72	2.7
300	4.05	4.2	3.99	3.95	3.92	3.9
500	6.6	6.57	6.54	6.51	6.48	6.45
800	10.3	10.	9.98	9.96	9.93	9.9

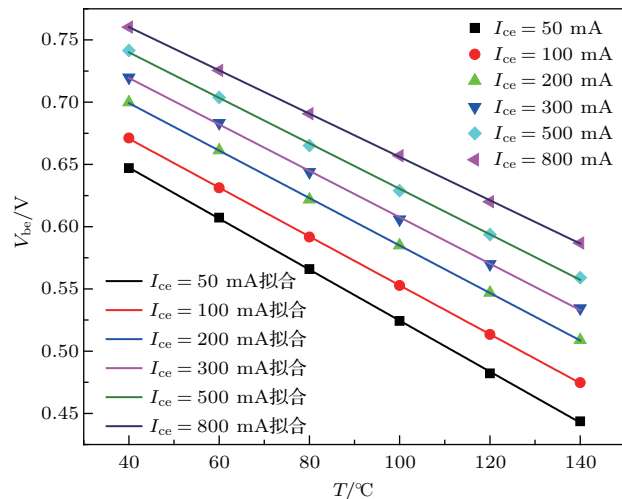


图 1 (网刊彩色) $V_{ce} = 20$ V 时拟合的校温曲线

Fig. 1. (color online) $V_{ce} = 20$ V, the fitting calibration curve.

从测量得到的实验数据可以发现: 在晶体管的实际工作中, 当电压 V_{ce} 和电流 I_{ce} 恒定时, 基极电流 I_{be} 会随着温度的变化而改变.

2.2 校温曲线的拟合曲线

对实验测量得到的数据进行线性拟合, 得到 $V_{ce} = 20$ V 时不同电流 I_{ce} 条件下对应的拟合校温曲线, 见图 1. 拟合公式为 $V_{be} = a + bT$.

从图 1 中可以看出拟合曲线和试验点基本重叠, 符合较好. 以 $I_{ce} = 50$ mA 为例, 拟合公式中的常数为: $a = 0.72861$, $b = -0.00204$, 不同的 I_{ce} 对应的拟合公式中的常数见表 2.

表 2 不同的 I_{ce} 对应的拟合常数

Table 2. Different I_{ce} corresponding fitting constants.

I_{ce}/mA	a	b
50	0.72861	-0.00204
100	0.74998	-0.00197
200	0.77566	-0.00191
300	0.79086	-0.00182
500	0.81054	-0.00179
800	0.82865	-0.00172

由拟合校温曲线和拟合公式可以得知: 在电压 V_{ce} 和电流 I_{ce} 恒定条件下发射结电压 V_{be} 和温度 T 呈良好的线性关系.

3 理论推导

由半导体器件物理^[16]可知, 以 npn 为例, 集电极电压 V_{ce} 会抽取 (BE) 结的电子扩散电流, 而对

BE 结的空穴扩散电流没有影响. 因此, V_{ce} 对输入特性曲线的影响在 $V_{ce} > 1$ V 后, 基本不变, 表现为当 $V_{ce} > 1$ V 时, 输入特性曲线不变. 即 BE 结仍可用 PN 结电流电压关系. 由半导体物理中的 PN 知识可知^[17]: 由理想 PN 结, 其正向电流 I_F 和压降 V_F 存在关系 $I_F = I_{s1} \exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right)$ 可推知, 发射结压降 V_{be} 和电流 I_{be} 的关系

$$I_{be} = I_{s1} \exp\left(\frac{qV_{be}}{kT}\right), \quad (1)$$

q 为电子电荷, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, I_s 为反向饱和电流中空穴电流,

$$I_{s1} = CT^r \exp\left[-\frac{qV_{g(0)}}{kT}\right], \quad (2)$$

C 是与结面积和掺杂浓度有关的常数, r 也为常数 (r 的数值取决于少数载流子迁移率对温度的关系). 将 (2) 式代入 (1) 式两边取对数得,

$$\begin{aligned} V_{be} &= V_{g(0)} - \left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_{be}}\right) T - \frac{kT}{q} \ln T^r \\ &= V_{\text{线性}} + V_{\text{非线性}}, \\ V_{\text{线性}} &= V_{g(0)} - \left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_{be}}\right) T, \\ V_{\text{非线性}} &= \frac{kT}{q} \ln T^r. \end{aligned} \quad (3)$$

下面讨论非线性项 $\frac{kT}{q} \ln T^r$ 的影响. 令 I_{be} 为常数, 当温度从 T_1 变为 T , 发射结压降 V_{be1} 变为 V_{be} 时,

$$V_{be1} = V_{g(0)} - \left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_{be}}\right) T - \frac{kT_1}{q} \ln T_1^r, \quad (4)$$

(3) 式和 (4) 式联立得

$$\begin{aligned} V_{be} &= V_{g(0)} - [V_{g(0)} - V_{be1}] \frac{T}{T_1} \\ &\quad - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{T}{T_1}\right)^r. \end{aligned} \quad (5)$$

理想线性温度相应 V_{be} 应取如下形式:

$$V_{be(\text{理想})} = V_{be1} + \frac{\partial V_{be1}}{\partial T} (T - T_1), \quad (6)$$

$\frac{\partial V_{be1}}{\partial T}$ 等于 T_1 温度时 $\frac{\partial V_{be}}{\partial T}$ 的值.

$$\frac{\partial V_{be1}}{\partial T} = -\frac{V_{g(0)} - V_{be1}}{T_1} - \frac{kT}{q} r. \quad (7)$$

将 (7) 式代入 (6) 式得

$$V_{be(\text{理想})} = V_{g(0)} - [V_{g(0)} - V_{be1}] \frac{T}{T_1}$$

$$- \frac{kT}{q} (T - T_1) r. \quad (8)$$

理想线性响应和实际响应相比较, 理论偏差为

$$\Delta = \frac{k}{q} (T_1 - T) r + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{T}{T_1}\right)^r. \quad (9)$$

取 $r = 3.4$ ^[18], $T_1 = 300$ K, $T = 310$ K, 代入 (9) 式得 $\Delta = 0.048$ mV, 相应 V_{be} 的改变量约为 20 mV, 相比之下误差为 0.2%. 所以可以忽略非线性项 $\frac{kT}{q} \ln T^r$ 的影响, (3) 式可写为

$$V_{be} = V_{g(0)} - \left(\frac{k}{q} \ln \frac{C}{I_{be}}\right) T. \quad (10)$$

将温度 T_1 、电压 V_{be1} 、电流 I_{be1} 代入 (10) 式得出 $\ln C = \ln I_{F1} + \frac{q[V_{g(0)} - V_{be1}]}{kT_1}$, 将 $\ln C$ 代入 (10) 式得

$$V_{be} = V_{g(0)} - \frac{k}{q} \left\{ \ln \frac{I_{be1}}{I_{be}} + \frac{q[V_{g(0)} - V_{be1}]}{kT_1} \right\} T, \quad (11)$$

即晶体管从温度 T_1 对应的发射结电压 V_{be1} 和基极电流 I_{be1} 变化到温度为 T 对应的发射结电压 V_{be} 和基极电流 I_{be} 的关系表达式. (11) 式存在一个非线性项 $\frac{k}{q} \ln \frac{I_{be1}}{I_{be}} T$. 根据文献中所述: 结温每上升 1 °C 结电压 V_{be} 就会下降 2 mV, 即结电压 V_{be} 的偏差在毫伏量级以下时对结温预测的影响小于 0.5 °C, 可以忽略. 所以, 当此非线性项的数值大小在 10^{-3} 数量级以下时, 基本可以认为该项对结电压的数值影响不足以对结温的预测造成影响. 即当 $\frac{k}{q} \ln \frac{I_{be1}}{I_{be}} T \leq 10^{-3}$ 时, 该项可以忽略. 以室温为参考点, 取 $T = 300$ K, I_{be1} 为室温下基极电流大小, 则当 $\ln \frac{I_{be1}}{I_{be}} T \leq 0.04$ 时, $I_{be} \geq \frac{I_{be1}}{1.04}$, 即以室温下基极电流数值为参考点, 基极电流数值 I_{be} 随温度变化不超过 4% 时, 基极电流的变化影响可以忽略不计.

从表 1 中可以看出: 晶体管正常工作条件下基极电流 I_{be} 随温度的变化在 3%—4%; 根据表 1 中基极电流的数据计算非线性项 $\frac{k}{q} \ln \frac{I_{be1}}{I_{be}} T$ 大概在 10^{-3} — 10^{-4} 数量级, 相比结电压 V_{be} 几百毫伏的数量级可以忽略不计, 且不对校温曲线的精度造成影响. 表 3 中列出了 40 °C 条件下和 140 °C 条件下该非线性项的大小, 表 4 则列出了 40 °C 条件下和 60 °C 条件下该非线性项的大小.

由表3和表4的数值可以看出非线性项 $\frac{k}{q} \ln \frac{I_{be1}}{I_{be}} T$ 的数值都在 10^{-3} — 10^{-4} 左右, 可以忽略; 即在晶体管的正常工作条件下, 基极电流 I_{be} 随温度的变化在4%以内, 对电流 I_{ce} 恒定条件下 V_{be} - T 的线性关系没有影响.

表3 40 °C 条件下和 140 °C 条件下非线性项的大小
Table 3. The size of the nonlinear term at 40 °C and 140 °C.

电流 I_{ce}/mA	$\frac{k}{q} \ln \frac{I_{be1}}{I_{be}}$
100	1.25×10^{-3}
200	1.30×10^{-3}
300	1.35×10^{-3}
500	8.23×10^{-4}
800	4.67×10^{-4}

表4 40 °C 条件下和 60 °C 条件下非线性项的大小
Table 4. The size of the nonlinear term at 40 °C and 60 °C.

电流 I_{ce}/mA	$\frac{k}{q} \ln \frac{I_{be1}}{I_{be}}$
100	2.00×10^{-4}
200	2.15×10^{-4}
300	1.43×10^{-4}
500	4.41×10^{-4}
800	1.07×10^{-4}

忽略非线性项 $\frac{k}{q} \ln \frac{I_{be1}}{I_{be}} T$, 则发射结电压 V_{be} 和温度 T 关系表达式为

$$V_{be} = V_{g(0)} - \frac{[V_{g(0)} - V_{be1}]}{T_1} T. \quad (12)$$

由(12)式变形得 $T = \frac{[V_{g(0)} - V_{be}]T_1}{[V_{g(0)} - V_{be1}]}$, 其中 T , V_{be} 可以取任意值; T_1 , V_{be1} 是校温曲线上任一点对应的温度和发射结电压; $\frac{T_1}{T_2} = \frac{[V_{g(0)} - V_{be1}]}{[V_{g(0)} - V_{be2}]}$, 则斜率 $\frac{[V_{g(0)} - V_{be1}]}{T_1} = \frac{[V_{g(0)} - V_{be2}]}{T_2}$ 是定值, 因此可以证明以室温下 I_{be} 数值为参考点, I_{be} 数值随温度变化不超过4% 时, V_{be} - T 关系曲线存在良好的线性关系且不受电流 I_{be} 变化的影响. 即根据(12)式: 在电压 V_{ce} 和电流 I_{ce} 恒定条件下, 只需测量得到该条件下校温曲线上任一点对应的温度和发射结电压 T_1 , V_{be1} , 以此为参考点并在线监测结电压 V_{be} , 即可做到对结温的在线监控.

4 结温在线测量的方法的提出及验证

对实验测量得到的校温曲线进行拟合, 证明了线性关系的真实存在, 通过理论推导得到了(12)式, 并与实验数据对比证明了公式的准确性. 该公式的提出简化了传统电学测温方法中复杂的测量工作和数据处理校准工作, 极大地提高了工程效率. 在实际应用过程中, 只需要确定参考点, 即给定已知参数 V_{be1} 和 T_1 , 无需关注电流 I_{be} 的情况而在线测量出结电压值 V_{be} 即可迅速计算出该时刻的结温. 与传统电学法测量结温时需测量校温曲线相比, 该方法极大地减小了测量过程和测量时间, 并避免了校温曲线的绘制和拟合过程. 在加速寿命实验和老炼实验等实际工程中可以利用此方法对结温进行在线监控, 确保结论的准确性, 在半导体可靠性领域有广泛的应用.

用美国 Phase11 分别测量双极晶体管型号为 2N3055 的上表壳热阻对应的结温和 2SD1047 的下表壳热阻对应的结温, 与用测试公式计算的结温进行了对比. 型号 2SD1047 晶体管的校温曲线见图2, 对比结果见表5和表6.

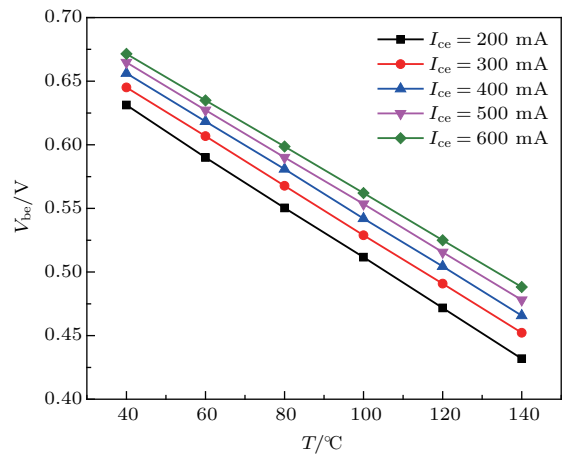


图2 (网刊彩色) 型号 2SD1047 晶体管的校温曲线
Fig. 2. (color online) Model 2SD1047 transistor temperature calibration curve.

表5 晶体管型号 2N3055 的对比实验结果
Table 5. Comparison of the transistor model 2N3055 experimental results.

测量方法	I_{ce}/mA			
	100	200	300	500
Phase11 测量/K	308.2	331.9	347.8	375.8
本方法/K	309.8	333.2	349.1	376.5

从表中的数据可以清晰地看到: 利用本方法所得到的结温值略大于 Phase11 的测量值, 误差在 0.7% 以内, 与真实情况相符. 所以, 通过对比实验可以证明本文提出的新方法可以准确快速地对晶体管的结温进行在线监控测量.

表 6 晶体管型号 2SD1047 的实验结果对比

Table 6. Comparison of the transistor model 2SD1047 experimental results.

测量方法	I_{ce}/mA				
	200	300	400	500	600
Phase11 测量/K	302	303.2	304.1	305.6	307.2
本方法/K	302.7	305.6	306.6	307.8	309.4

5 结 论

在电压 V_{ce} 恒定的条件下, 通过对不同电流 I_{ce} 条件下的校温曲线的研究发现: 以室温下基极电流数值为参考点, 当基极电流数值随温度变化不超过 4% 时, $V_{be}-T$ 关系曲线具有良好线性关系, 且理论上引起的温度误差在 0.5 °C 以内. 对校温曲线进行线性拟合, 发现实验数据和拟合曲线基本重叠, 证实了线性关系的真实存在. 基于理论公式推导, 提出了 (12) 式 $V_{be} = V_{g(0)} - \frac{[V_{g(0)} - V_{be1}]}{T_1}T$: 在电压 V_{ce} 和电流 I_{ce} 恒定的条件下, 测量得到参考点的 V_{be1} 和 T_1 , 实时测出 V_{be} , 代入公式中就可实时计算出结温. 通过对比实验证明了该方法的准确性和运用此方法计算结温的可行性. 该方法的提出简化了传统电学测量方法中复杂的实验过程和制图步骤, 极大地提高了效率, 解决了在加速寿命实验和老炼实验等实际工程中对结温快速在线监控的问题, 确保了实验数据的可靠度, 在器件可靠性研究领域有广泛应用.

参考文献

- [1] Maset E, Sanchis Kilders E, Ejea J B, Ferreres A 2009 *IEEE Trans. Dev. Mater. Reliab.* **9** 557
- [2] Qi H C, Zhang X L, Xie X S 2013 *J. Semicond.* **34** 064010

- [3] Rong B H, Wang X Y, An Z F, Zhong L, Chen G Y, Zhang C S 2008 *Semicond. Technol.* **33** 360 (in Chinese) [荣宝辉, 王晓燕, 安振峰, 仲琳, 陈国鹰, 张存善 2008 半导体技术 **33** 360]
- [4] Guo C S, Li S W, Ren Y X, Gao L, Feng S W, Zhu H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 077201 (in Chinese) [郭春生, 李世伟, 任云翔, 高立, 冯士维, 朱慧 2016 物理学报 **65** 077201]
- [5] Li R, Guo C S, Feng S W, Shi L, Zhu H, Wang L 2015 *Chin. Phys. B* **24** 076601
- [6] Jia Y, Zeng C H, Liang W, Li D, Li J H 2016 *Semicond. Technol.* **31** 35 (in Chinese) [贾颖, 曾晨晖, 梁伟, 李逗, 李霁红 2016 半导体技术 **31** 35]
- [7] Avenas Y, Dupont L, Khatir Z 2012 *IEEE Trans. Power Electron.* **27** 3081
- [8] Yuan Y, Xiang D, Ning C 2016 *IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference Hefei, China, May 22–25, 2016* p3125
- [9] Kuhn H, Mertens A 2009 *European Conference on Power Electronics and Applications IEEE Barcelona, September 8–10, 2009* p1
- [10] Wang L 2015 *M. S. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Technology) (in Chinese) [王琳 2015 硕士学位论文 (北京: 北京工业大学)]
- [11] Senturk O S, Munk-Nielsen S, Teodorescu R, Helle L, Rodriguez P 2011 *Energy Conversion Congress and Exposition IEEE Phoenix, Arizona, USA, September 17–22, 2011* p568
- [12] Xu Z, Wang F, Ning P 2012 *Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE Raleigh, North Carolina, USA, September 15–20, 2012* p91
- [13] Baker N, Munk-Nielsen S, Iannuzzo F, Liserre M 2015 *IEEE Trans. Power Electron.* **31** 3784
- [14] Baker N, Munk-Nielsen S, Iannuzzo F, Liserre M 2015 *Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE Charlotte, NC, USA, March 15–19, 2015* p1270
- [15] Zhu Y J, Miao Q H, Zhang X H, Yang L Y, Lu S J 2007 *J. Semicond.* **28** 980 (in Chinese) [朱阳军, 苗庆海, 张兴华, 杨 Lieyang, 卢烁今 2007 半导体学报 **28** 980]
- [16] Sze S M, NG K K (translated by Geng L, Zhang R Z) 2008 *Physics of Semiconductor Devices* (Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press) pp188–195 (in Chinese) [施敏, 伍国珏 著 (耿莉, 张瑞智 译) 2008 半导体器件物理 (西安: 西安交通大学出版社) 第 188—195 页]
- [17] Liu E K, Zhu B S, Luo J S *et al.* 2010 *Semiconductor Physics* (Beijing: National Defense Industry Press) p172 (in Chinese) [刘恩科, 朱秉生, 罗晋生等 2010 半导体物理学 (北京: 国防工业出版社) 第 172 页]
- [18] Chen S Q 2000 *Phys. Exp.* **20** 7 (in Chinese) [陈水桥 2000 物理实验 **20** 7]

High-efficiency on-line measurement of junction temperature based on bipolar transistors in accelerated experiment^{*}

Guo Chun-Sheng[†] Ding Yan Jiang Bo-Yang Liao Zhi-Heng Su Ya Feng Shi-Wei

(Deputy Dean, College of Electronic Science and Technology, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 23 February 2017; revised manuscript received 20 August 2017)

Abstract

Junction temperature is an important factor affecting the reliabilities of semiconductor devices. Usually, the method of measuring the junction temperature is not tested on-line. However, due to the fact that neither contact thermal resistance nor thermal resistance varying with temperature is taken into account, there exists an error in the off-line measurement. A way to solve the problem of off-line measurement is to measure the junction temperature on-line. In this paper, we propose an electrical method of measuring the temperature rise of high-power bipolar transistor in the working condition. The measurement method is based on a good linear relationship between base-emitter voltage (V_{be}) and temperature during the steady-state. Taking the model 2N3055 of bipolar high power transistor for example, in this paper we study the relationship between base-emitter voltage (V_{be}) and temperature under the conditions of constant collector-emitter voltage (V_{ce}) and collector-current (I_{ce}). During the experiment, the device is placed in a thermostat. A voltage is applied to the device collector, a current is applied to the base, and the emitter is earthed. Before the device is measured, we set different temperatures and make sure that the equipment is in a steady state. In order to avoid the effect of self-heating, the pulse current is used in the experiment. The pulse width and the period are 500 μ s and 1 ms, respectively.

The research result shows that the base-emitter voltage (V_{be}) decreases linearly with temperature increasing and the base-emitter current is changed below 4% when the temperature is in a range of 40 °C–140 °C. In this paper we also deduce the mathematical expressions for base-emitter voltage (V_{be}) and temperature under a steady state. It is proved that the V_{be} -temperature curve is linear and temperature error is less than 0.5 °C when the changes of base current value does not exceed 4%. Therefore, in this paper we deduce a new method of testing the junction temperature in the speeding up measurement experiment. By measuring any of the reference points on the calibration curve under certain experimental conditions, the junction temperature can be calculated quickly according to the proposed formula.

Finally, the phase 11 is used to verify the proposed method. We measure the thermal resistance upper the case for the junction of model 2N3055 and the thermal resistance under the case for the junction of model 2SD1047. The measurement results of phase 11 are compared with the junction temperature calculated using the test formula. The results show that the error of junction temperature between the two methods is less than 0.7%, which is corresponding with the needs of practical application. It proves the correctness and feasibility of the method.

Keywords: power device, junction temperature, electrical method, on-line monitoring

PACS: 47.80.Fg, 85.30.Pq, 85.30.-z, 84.37.+q

DOI: 10.7498/aps.66.224703

^{*} Project supported by the Beijing Municipal Commission of the Education Foundation of China (Grant No. KM201510005008).

[†] Corresponding author. E-mail: guocs@bjut.edu.cn