

瞬态大电流测量结温中校温曲线弯曲现象的研究

郭春生 王琳 翟玉卫 李睿 冯士维 朱慧

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

Guo Chun-Sheng Wang Lin Zhai Yu-Wei Li Rui Feng Shi-Wei Zhu Hui

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 184704 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.184704

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184704>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I18>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑模型不确定性和时延的静止无功补偿器自适应滑膜控制器设计

[Design of the static var compensator adaptive sliding mode controller considering model uncertainty and time-delay](#)

物理学报.2014, 63(23): 238407 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.238407>

基于多尺度熵的电力能量流复杂性分析

[Complexity analysis of power system energy flow based on multi-scale entropy](#)

物理学报.2014, 63(20): 208402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.208402>

"荧光-1"实验装置物理设计

[Physical design of the "Ying-Guang 1" device](#)

物理学报.2013, 62(7): 078407 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.078407>

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>

基于火焰发射光谱的转动温度和振动温度的测量

[Measurements of rotational and vibrational temperatures based on flame emission spectroscopy](#)

物理学报.2011, 60(10): 104702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.104702>

## 瞬态大电流测量结温中校温曲线弯曲现象的研究\*

郭春生<sup>1)†</sup> 王琳<sup>1)</sup> 翟玉卫<sup>2)</sup> 李睿<sup>1)</sup> 冯士维<sup>1)</sup> 朱慧<sup>1)</sup>

1) (北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

2) (中国电子科技集团第十三研究所, 石家庄 050051)

(2015年2月1日收到; 2015年4月27日收到修改稿)

利用脉宽 250  $\mu\text{s}$ 、占空比 5% 的 0—1.5 A 脉冲电流, 分别在 50, 70, 90, 110, 130  $^{\circ}\text{C}$  条件下, 对 TO-247-2L 封装型 PIN 快恢复二极管大电流下的校温曲线进行了测量分析. 研究发现, 恒定大电流条件下, 二极管的校温曲线随温度变化发生弯曲. 分析表明, 弯曲现象主要是由于串联电阻受迁移率的影响随温度发生变化而引起的. 通过实验测量及理论计算, 得到了准确的非线性校温曲线, 从而减小了瞬态大电流测量结温中的误差.

**关键词:** 二极管, 瞬态大电流, 校温曲线, 串联电阻

**PACS:** 47.80.Fg, 84.70.+p, 85.30.-z, 43.58.Ry

**DOI:** 10.7498/aps.64.184704

## 1 引言

随着半导体器件不断向尺寸小、集成度高等方向发展, 功率二极管需要在不同的高电流电压脉冲或开关条件下工作, 器件的瞬态功率密度大, 瞬态温升高, 导致器件特性下降, 使用可靠性降低, 寿命缩短. 为了准确评价其可靠性, 对器件瞬态温升的准确测量尤为重要.

针对二极管结的瞬态温升测试, 目前多采用开关切换的电学法, 相关标准主要有国军标 128A-97 3103, 美军标 MIL-STD-750E3101.4 等, 测试设备均带有开关装置. 此开关装置的作用是在采集器件工作结电压时, 首先给器件通入工作电流, 当器件达到热稳态后, 利用此开关装置将工作电流切换为较小的测试电流, 在器件冷却过程中采集器件的结电压. 然而, 工作电流和测试电流切换过程中会产生时间延迟. 据 Kuball 等<sup>[1]</sup> 报道, 1  $\mu\text{s}$  的时间延迟可能导致温度变化超过 100  $^{\circ}\text{C}$ . 而现行的设备如 PHASE11, Tster3 等, 延迟时间一般为 1—100  $\mu\text{s}$ , 导致结温测量不准确.

针对上述问题, 国内外对二极管的结温测试方

法进行了大量的研究. Profumo 和 Zhu<sup>[2]</sup> 利用二极管和晶闸管瞬态电流时瞬态结温电热模型来推测瞬态结温波形. Rakhmatov 等<sup>[3]</sup> 研究了 P-N 结随脉冲电压变化从而对 P-N 结结温造成的影响. Abdulkhaev 等<sup>[4]</sup> 研究了脉冲功率条件下不同温度时二极管与恒温箱温度的关系. 胡振邦<sup>[5]</sup> 利用脉冲电学法对发光二极管 (LED) 结温进行研究. 陈焕庭<sup>[6]</sup> 利用瞬态电学法对大功率 LED 结温测量进行研究, 并找出结温测量的准确方法. 朱阳军等<sup>[7]</sup> 通过对用脉冲幅度可调的程控恒流源采集被测晶体管基极发射极之间在不同温度下的  $I-V$  数据, 得到本底数据. 直接把加热电流当作测量电流, 借助于校准曲线从而测量出晶体管的结温. 卢烁今<sup>[8]</sup> 利用  $I-V-T$  聚集效应推导出任意温度下  $I-V$  特性从而可推出瞬态结温. 孔维贤<sup>[9]</sup> 的研究表明二极管串联电阻对  $I-V$  特性曲线的影响也会影响到瞬态结温的测量. 胡红钱和张文成<sup>[10]</sup> 提出了一种在线实时测量整流管 PN 结结温的有效方法. 刘宾礼等<sup>[11]</sup> 研究了绝缘门极晶体管 (IGBT) 与电压变化率的关系, 实现了对 IGBT 结温的在线监测.

以上文献均对大电流瞬态温升测量做出了有

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61204081) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guocs@bjut.edu.cn

益探索, 但均基于结电压随温度的线性变化校温曲线. 在实际测量中, 大电流实时测量结温的校温曲线并非线性, 利用线性校温曲线测量结温, 会引入测量误差. 而非线性校温曲线服从的关系及物理机理尚未见报道.

针对瞬态大电流条件下校温曲线的弯曲现象, 本文利用脉宽 250  $\mu\text{s}$ , 占空比 5% 的 0—1.5 A 脉冲电流分别在 50, 70, 90, 110, 130  $^{\circ}\text{C}$  条件下, 对吉林华微生产的 TO-247-2L 封装的型号为 30F120W 的 PIN 快恢复二极管进行研究, 探究校温曲线弯曲的物理机理, 并研究串联电阻及器件自升温对校温曲线弯曲的影响.

## 2 校温曲线及串联电阻

校温曲线测量是测量器件结温前的一个重要步骤. 传统电学法测量器件结温通常利用小电流测量校温曲线, 以避免自升温误差. 但传统电学法测温时, 工作电流和测试电流切换过程中会产生时间延迟. 为了消除开关切换产生的误差, 目前研究中常采用测试电流和工作电流相一致的方法, 即在测量校温曲线时直接给器件施加工作电流. 为了避免施加大电流带来的自升温, 一般采用脉冲大电流测量校温曲线. 然而, 在我们的研究过程中, 发现利用脉冲大电流获取的校温曲线会产生弯曲现象.

瞬态大电流测量校温曲线时, 其理论公式<sup>[12]</sup>推导如下.

串联电阻一般指导致二极管正向特性非理想的电阻, 主要包括体电阻和欧姆接触电阻, 会造成  $I$ - $V$  曲线发生偏差, 即串联电阻产生的电压为

$$\Delta V = IR_s = I(R_1 + R_2), \quad (1)$$

其中,  $\Delta V$  为串联电阻产生的电压,  $I$  为二极管正向电流,  $R_s$  为串联电阻,  $R_1$  为体电阻,  $R_2$  为欧姆接触电阻.

理想条件下  $I$ - $V$  关系式为

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

其中,  $V$  为二极管结电压,  $I_s$  为反向饱和电流,  $n$  为理论因子,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $q$  为电子电荷.

而考虑串联电阻后实际  $I$ - $V$  关系式为

$$I = I_s \left\{ \exp\left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right] - 1 \right\}. \quad (3)$$

将 (3) 式两边取自然对数可得

$$V = \left(\frac{nkT}{q}\right) \cdot \ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right) + IR_s. \quad (4)$$

串联电阻表达式为

$$R_s = R_1 + R_2, \quad (5)$$

体电阻表达式为

$$R_1 = \frac{\rho L}{S}, \quad (6)$$

其中,  $\rho$  为电阻率,  $L$  为长度,  $S$  为面积.

欧姆接触电阻表达式为

$$R_2(T), \quad (7)$$

电阻率表达式为

$$\rho = \frac{1}{nq\mu}, \quad (8)$$

其中,  $\mu$  为迁移率.

迁移率表达式为

$$\mu = \left(\frac{q}{m}\right) \cdot \left[\frac{1}{(AT^{3/2} + \frac{BN_i}{T^{3/2}})}\right], \quad (9)$$

其中,  $m$  为有效质量.

由 (5)—(9) 式可得, 串联电阻与温度的关系为

$$R_s = \left[\frac{lm}{nSq^2}\right] \cdot \left(AT^{3/2} + \frac{BN_i}{T^{3/2}}\right) + R_2(T). \quad (10)$$

由 (4) 式可看出由  $IR_s$  的影响,  $\ln I$ - $V$  并不成线性关系. 由 (10) 式可知, 根据经典半导体物理理论, 30  $^{\circ}\text{C}$ —130  $^{\circ}\text{C}$  范围内, 硅材料高纯样品 ( $N_i = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ) 或杂质浓度较低的样品 ( $N_i = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) 中, 迁移率随温度升高而迅速减小, 这是由于  $N_i$  很小, 电离杂质散射  $BN_i/T^{3/2}$  可忽略, 迁移率变化主要受晶格杂质散射  $AT^{3/2}$  的影响<sup>[12]</sup>. 而文献<sup>[13]</sup>中提到, 欧姆接触电阻  $R_2$  在 30  $^{\circ}\text{C}$ —130  $^{\circ}\text{C}$  范围内基本不随温度而变化, 即 (10) 式中  $R_2(T)$  基本不变, 可以忽略. 因此,  $R_s$  与  $T^{3/2}$  线性正相关. 通过上述公式推导, 得到了校温曲线弯曲现象的理论依据.

## 3 实 验

本文对二极管进行瞬态温升测试<sup>[14,15]</sup>, 将二极管置于温箱 Despatch 900 series 内, 利用 Agilent371 B 图示仪对器件进行校温曲线测量. 为了避免器件自升温带来的影响, 对器件施加脉宽为

250  $\mu\text{s}$ 、占空比小于5%的脉冲电流. 图1所示为脉冲电流波形, 脉冲电流由0—1.5 A逐步增大. 待二极管分别在50, 70, 90, 110, 130  $^{\circ}\text{C}$  下到达热稳态时, 向二极管通入0—1.5 A的脉冲电流, 测得其  $I$ - $V$  特性曲线, 如图2所示. 扫描记录各个数据, 提取在不同电流下电压随温度的变化数据, 即得到二极管在脉冲大电流条件下的校温曲线, 如图3所示.

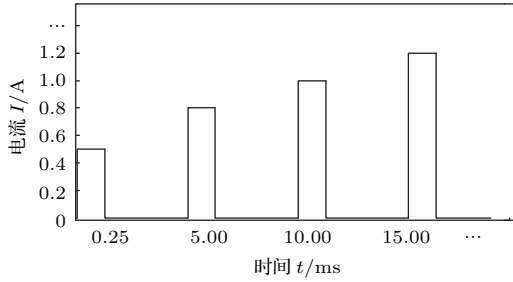


图1 脉冲电流波形示意图

Fig. 1. Pulse current waveform diagram.

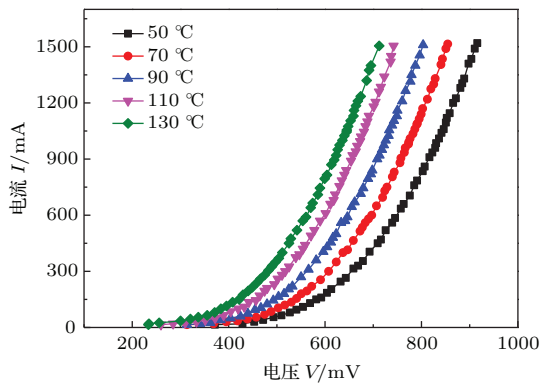


图2 (网刊彩色) 二极管  $I$ - $V$  特性曲线

Fig. 2. (color online)  $I$ - $V$  characteristic curve.

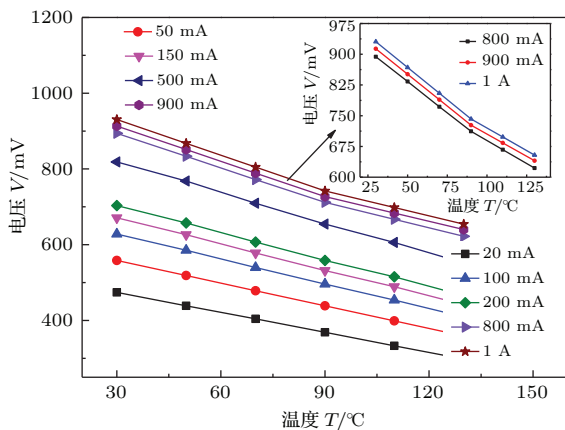


图3 (网刊彩色) 不同电流下二极管校温曲线

Fig. 3. (color online) Temperature calibration curve.

利用 AgilentB1500 半导体精密测试仪, 测量二极管工作到稳态的结电压变化曲线, 并结合校温曲线即可得到二极管的瞬态结温变化曲线.

#### 4 结果分析

通过对图3中  $I = 1$  A时校温曲线已知数据点的拟合计算, 推导出了图4的实测数据. 从图4可以看出, 校温曲线的斜率随温度升高而发生变化, 产生这种现象的原因主要是由于迁移率随温度的升高而降低, 导致串联随温度的升高而变大. 温度升高的原因可能是由于外加温箱对器件加热或器件的自升温.

针对上述问题, 对图2中部分温度下的  $I$ - $V$  特性曲线中的电流  $I$  取自然对数并对数据进行拟合, 得到  $\ln I$ - $V$  关系曲线实验数据和理想数据, 如图5所示.

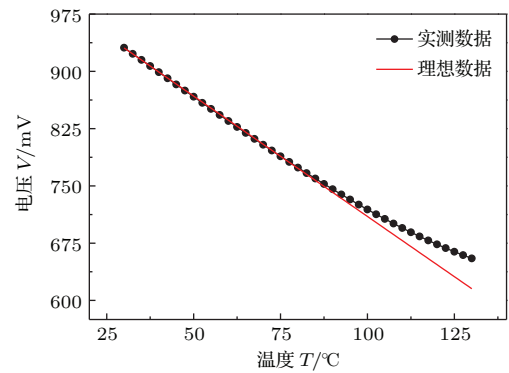


图4 1 A 电流下二极管的实际校温曲线与理想校温曲线

Fig. 4. Actual and ideal temperature coefficient curve in 1 A.

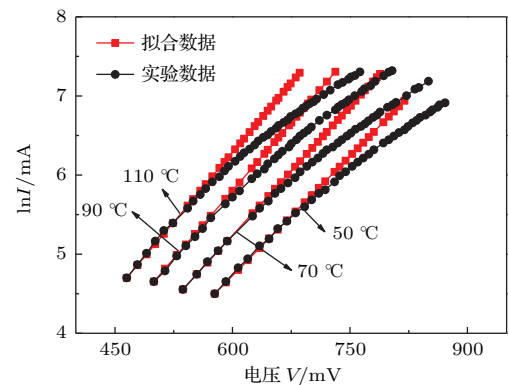


图5 (网刊彩色) 不同温度下  $\ln I$ - $V$  实验曲线与理想拟合直线

Fig. 5. (color online)  $\ln I$ - $V$  experimental curve and ideal fitting line under the different temperature.

根据上文所述, 理想情况下,  $V = (nkT/q) \cdot \ln(I/I_s + 1)$ , 即  $\ln I-V$  应成线性关系, 但由图 5 发现两者并不成线性关系.

为了证明器件自升温对串联电阻的影响, 表 1 列出了部分电流值下, 理想  $\ln I$  和实测  $\ln I$  对应其电压差值除以此时的电流得出的此电流值下的串联电阻值, 即  $R_s = (V_{\text{实测}} - V_{\text{理想}})/I$ , 其中,  $V_{\text{实测}}$  为实际测量条件下器件的结电压,  $V_{\text{理想}}$  为理想状态下器件的结电压.  $90^\circ\text{C}$  时, 串联电阻  $R_s = (44 \pm 1) \text{ m}\Omega$ , 规律性比较明显, 在同一温度、不同电流条件下, 器件自升温会引起  $R_s$  的改变. 而由表 1 中的数据发现,  $R_s$  基本不变. 所以可以排除器件自升温对校温曲线弯曲的影响. 因此器件温度的升高是外加温箱对器件加热造成的.

表 1  $90^\circ\text{C}$  时部分电流下的串联电阻  
Table 1. Series resistance about some current in  $90^\circ\text{C}$ .

电流/A	串联电阻/mΩ
0.7	44.01
0.75	43.36
0.8	43.7
0.9	43.84
0.95	43.68
1	43.79
1.3	45.08
1.5	45.38

而串联电阻  $R_s$  引起的电压  $\Delta V = IR_s$ . 将  $\Delta V$  与器件的实际测量结电压  $V_{\text{实测}}$  相比, 两者的百分比  $k = \Delta V/V_{\text{实测}}$  为串联电阻所引起的电压在结电压中所占的比例值, 见表 2. 当电流小于  $200 \text{ mA}$  时,  $\Delta V$  与  $V_{\text{实测}}$  的比值小于 1%, 对于器件的结电压

表 2 部分电流温度条件下串联电阻电压与结电压的比值  
Table 2. The ratio of series resistance voltage and junction voltage.

百分比 温度	电流						
	20 mA	50 mA	100 mA	200 mA	800 mA	900 mA	1 A
50 °C	0.17%	0.36%	0.65%	0.75%	4.01%	4.08%	4.44%
70 °C	0.19%	0.41%	0.75%	0.84%	4.19%	4.62%	5.01%
90 °C	0.22%	0.48%	0.86%	0.9%	4.95%	5.31%	5.8%
110 °C	0.28%	0.56%	0.95%	0.98%	5.51%	6.04%	6.58%

来说, 串联电阻所引起的电压值较小, 对于校温曲线弯曲的影响可以忽略. 而电流大于  $800 \text{ mA}$  时,  $\Delta V$  与  $V_{\text{实测}}$  的比值大于 4%, 串联电阻的分压作用加大, 因此不能再忽略其对校温曲线弯曲的影响.

针对迁移率对串联电阻  $R_s$  的影响, 图 8 给出了电流  $I = 1 \text{ A}$  时串联电阻随温度变化的关系曲线. 迁移率变化主要受电离杂质散射和晶格振动散射的影响. 本实验中选用的二极管为硅二极管, 杂质浓度约为  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 在室温到  $130^\circ\text{C}$  的温度范围内, 迁移率主要受晶格振动散射的影响,  $BN_i/T^{3/2}$  可忽略. 随着温度的升高, 迁移率开始下降.

由图 6 所示, 通过拟合可得到  $y = 36 + 0.009x^{3/2}$ , 即:  $R_s = 36 + 0.009Tx^{3/2}$ , 则串联电阻  $R_s \propto T^{3/2}$ . 而由理论公式可知:

$$\mu = \left(\frac{q}{m}\right) \cdot \left(AT^{3/2} + \frac{BN_i}{T^{3/2}}\right)^{-1},$$

$$\text{即 } \mu \propto T^{-3/2} \cdot R_s = \left[\frac{lm}{nSq^2}\right] \left(AT^{3/2} + \frac{BN_i}{T^{3/2}}\right) + R_2,$$

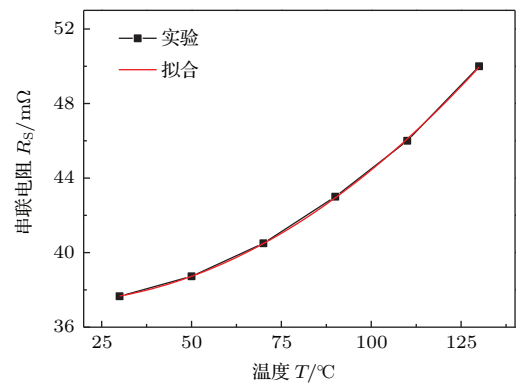


图 6 (网刊彩色) 1 A 电流下串联电阻随温度变化曲线 [16]  
Fig. 6. (color online) series resistance with the temperature change curve in 1 A.

由于欧姆接触电阻  $R_2$  在 30 °C—130 °C 的温度范围内随温度的变化可以忽略, 因此,  $R_s$  与  $T^{3/2}$  线性正相关. 实验所得的串联电阻随温度的变化曲线与理论公式中串联电阻与温度关系的指数相同. 因此, 可认为由于迁移率随温度的变化而导致串联电阻随温度的升高而增大, 从而造成了校温曲线的弯曲现象. 利用  $R_s$  的变化规律即可推出任意温度下串联电阻的阻值, 从而可推导出各温度下校温曲线的准确数据.

## 5 结 论

本文针对器件复杂的温度变化过程, 利用瞬态大电流校温法对吉林华微生产的 TO-247-2L 封装的型号为 30F120W 的 PIN 快恢复二极管, 针对校温曲线随温度升高时发生弯曲的现象进行了深入的研究. 结果表明, 在脉宽 250  $\mu$ s, 占空比 5% 的脉冲电流下, 校温曲线的弯曲不受二极管自升温的影响, 主要是由于迁移率随温度的升高发生变化, 使串联电阻随温度的升高而增大, 导致器件结电压的升高, 造成校温曲线的弯曲. 本文最终得到了准确的非线性校温曲线. 利用本文方法得到的校温曲线, 可准确地测量器件结温.

## 参考文献

- [1] Kuball M, Riedel G J, Pomeroy J W, Sarua A, Uren M J, Martin T, Hilton K P, Maclean J O, Wallis D J 2007 *IEEE* **28** 86
- [2] Profumo F, Zhu Y J 2000 *Converter Technology & Electric Traction* **2** 20 (in Chinese) [Profumo F, 朱咏嘉 2000 变流技术与电力牵引 **2** 20]
- [3] Rakhmatov A Z, Abdulkhaev O A, Karimov A V, Yodgorova D M 2012 *J. Engineer. Phys. Thermophys.* **85** 836
- [4] Abdulkhaev O A, Yodgorova D M, Karimov A V, Karimov A A, Asanova G O 2012 *J. Engineer. Phys. Thermophys.* **85** 851
- [5] Hu Z B 2014 *M. S. Dissertation* (Xiamen: Xiamen University) (in Chinese) [胡振邦 2014 硕士学位论文 (厦门: 厦门大学)]
- [6] Chen H T 2010 *M. S. Dissertation* (Xiamen: Xiamen University) (in Chinese) [陈焕庭 2010 硕士学位论文 (厦门: 厦门大学)]
- [7] 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, Yang Lieyong, 卢烁今 2007 半导体学报 **28** 980]
- [8] Lu S J 2007 *M. S. Dissertation* (Shandong: Shandong University) (in Chinese) [卢烁今 2007 硕士学位论文 (济南: 山东大学)]
- [9] Kong W X 2013 *M. S. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University) (in Chinese) [孔维贤 2013 硕士学位论文 (南京: 南京大学)]
- [10] Hu H Q, Zhang W C 2013 *Electronics World* **61** 60 (in Chinese) [胡红钱, 张文成 2013 电子世界 **61** 60]
- [11] Liu B L, Tang Y, Luo Y F, Liu D Z, Wang R T, Wang B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 177201 (in Chinese) [刘宾礼, 唐勇, 罗毅飞, 刘德志, 王瑞田, 汪波 2014 物理学报 **63** 177201]
- [12] Liu E K *et al.* 2010 *Semicond. Phys.* (Beijing: National Defense Industry Press) p97, 156 (in Chinese) [刘恩科等 2010 半导体物理学 (北京: 国防工业出版社) 第 97, 156 页]
- [13] Zhang Y Z 2009 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Technology) (in Chinese) [张跃宗 2009 博士学位论文 (北京: 北京工业大学)]
- [14] Chen M, Hu A, Tang Y, Wang B 2012 *J. Xi'an Jiaotong Univ.* **46** 70 (in Chinese) [陈明, 胡安, 唐勇, 汪波 2012 西安交通大学学报 **46** 70]
- [15] Chen Q, Luo X, Zhou S, Liu S 2011 *Rev. Sci. Instrum.* **82** 084904
- [16] Li B Q, Liu Y H, Feng Y C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 477 (in Chinese) [李炳乾, 刘玉华, 冯玉春 2008 物理学报 **57** 477]

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

Guo Chun-Sheng<sup>1)†</sup> Wang Lin<sup>1)</sup> Zhai Yu-Wei<sup>2)</sup> Li Rui<sup>1)</sup>  
Feng Shi-Wei<sup>1)</sup> Zhu Hui<sup>1)</sup>

1) (College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

2) (The 13th Research Institute Of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

( Received 1 February 2015; revised manuscript received 27 April 2015 )

## Abstract

To measure the junction temperature of diodes under operating conditions, the temperature calibration curve is studied under large current conditions. To avoid the self heating by the large current conditions, pulsed currents are used in the paper. The temperature calibration curve of TO-247-2L fast recovery diode is investigated in this paper. The 0–1.5 A pulse current, of which the pulse width is 250  $\mu$ s and the duty cycle is 5%, is chosen to study the temperature calibration curves under 50, 70, 90, 110, 130  $^{\circ}$ C respectively.

The results show that under the large current condition, the temperature calibration curve bends. The main reason for the bending phenomenon is that the series resistance changes with temperature increasing, which is affected by the mobilities of electrons and holes in semiconductor material. With the temperature rising, the mobility decreases, which results in the increasing of series resistance. Due to the series resistance increasing The voltage on p-n junction will be reduced. For this reason, a higher voltage is needed to obtain the same current, and the temperature calibration curve will bend.

There are two reasons which will lead to the temperature rising. The first reason is self-heating of devices by the power dissipation, and the second reason is that the temperature of device is heated by ambient temperature. Under the same temperature, self-heating behaviors of device by different currents will result in different series resistances. But in the paper, the results show that the series resistances under different currents are the same, which illustrates that self-heating is not the key reason for the change of series resistance. So, the temperature changing of the diode is caused by the ambient temperature rising, which verifies that the bending phenomenon of the temperature calibration curve of TO-247-2L fast recovery diode is caused by the ambient temperature rising.

Then, through experimental measurements and theoretical calculations, the accurate nonlinear temperature calibration curve is acquired, which can reduce the measurement errors of high current transient junction temperature.

**Keywords:** diode, the high transient current, temperature calibration curve, series resistance

**PACS:** 47.80.Fg, 84.70.+p, 85.30.-z, 43.58.Ry

**DOI:** 10.7498/aps.64.184704

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61204081).

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