

一种测量 RTD 串联电阻的新方法*

郭维廉^{1,2} 宋瑞良² 王伟^{1,†} 于欣¹ 牛萍娟¹ 毛陆虹² 张世林² 梁惠来²

(1 天津工业大学信息与通信学院, 天津 300160)

(2 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 根据 RTD 峰值电压 V_p 与串联电阻 R_s 、外加电阻 R_{ex} 的关系, 提出一种新的测量 RTD 串联电阻 R_s 的方法. 实验证明该方法具有准确、简便、快速等特点. 文中给出 V_p 与 R_s 、 R_{ex} 关系的推导, R_s 测量原理、测量结果和与其他 R_s 测量方法的比较.

关键词: RTD 参数; 串联电阻的测量方法; RTD 器件性能表征

EECC: 2560X; 2560Z; 2560H

中图分类号: TN313+.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)05-0950-04

1 引言

串联电阻 R_s 是共振隧穿二极管 (RTD) 的一个重要器件参数, 在 RTD 的设计和研制过程中, 常常由于设计和工艺上存在的问题而造成器件的 R_s 数值过高. 这种过高的 R_s 会引起实际的峰值电压 V_p 过大, 容易出现“表观正阻”或电压峰谷比 (PVVR) 反常 ($PVVR > 1$) 的现象, 使 RTD 的阻性截止频率 f_R 下降, 以及 RTD 毫米波振荡器输出功率和振荡稳定性变坏. 因此及时对 RTD 的串联电阻 R_s 进行检测是非常必要的.

目前已报道的 RTD 串联电阻 R_s 测量方法有两种: (1) 网络分析仪测量法^[1]: 利用网络分析仪测量 RTD 不同频率下的 S (散射) 参数, 再通过 S 参数与 RTD 等效电路参数 (包括 R_N , C , R_s , L_s) 间的关系, 用曲线拟合法提取 R_s 的最佳值; (2) 不同温度 I - V 特性法^[2]: 从不同温度下 RTD 的 I - V 特性第二正阻区的斜率提取 R_s 值, 所用公式为:

$$R_T = \frac{dV}{dI} = \left(\frac{kT}{q}\right) \frac{1}{I_D} + R_s \quad (1)$$

式中 R_s 为 RTD 串联电阻; I_D 为 RTD 第二正阻区某电流值; R_T 为从 I_D 点 I - V 特性斜率 (切线) 得到的总电阻值; k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; q 为电子电荷. 上述方法 (1) 需要网络分析仪和级联微波探针等昂贵大型设备, 而且拟合过程和步骤也较为繁杂; 方法 (2) 要有变温设备得到不同温度下的 I - V 特性曲线. 这些都为 RTD 的 R_s 测量带来了一定的不便. 由于以上的原因作者提出了一种简便、快速而又准确的 RTD 串联电阻 R_s 的测量方法. 利用这种方法可以随时方便地测量 RTD 器件的串联电阻 R_s .

2 峰值电压 V_p 与串联电阻 R_s , 外加电阻 R_{ex} 的关系

文献[3,4]指出, 在 RTD 的双势垒单势阱结构中, 当发射区不存在电子积累层和集电区不存在电子耗尽层, 同时不考虑器件串联电阻 R_s 和外加电阻 R_{ex} 的情况下, 对应于最大电流密度 J_m (也即峰值电流密度 J_p) 的外加电压 V (也即 V_p) (参见文献[3]中图 3 或文献[4]中图 4) 为:

$$V_p = \frac{2E_0}{q} + 2\alpha E_F \quad (2)$$

式中 E_0 为势阱中基态能量; q 为电子电荷; E_F 为费米能级.

$$\alpha = \frac{Q_m q}{2CE_F} \quad (3)$$

其中 Q_m 为势阱中积累的最大电量; C 为双势垒结构的电容.

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{2L_B + L_w} \quad (4)$$

式中 ϵ_r 和 ϵ_0 分别为相对介电常数和真空电容率; L_B 和 L_w 分别为势垒和势阱宽度. Q_m 又可表示为:

$$Q_m = \frac{qk_F^2}{2\pi} \times \frac{T_E}{T_E + T_C} \quad (5)$$

其中 k_F^2 表示 $E = E_F$ 时对应的波矢量; T_E 和 T_C 分别表示发射势垒和收集势垒的电子隧穿几率. 将 (3) 式代入 (2) 式, 有:

$$V_p = \frac{2E_0}{q} + \frac{Q_m}{C} \quad (6)$$

(6) 式表明 V_p 为势阱中积累电荷量的函数. 当无电荷时:

* 超高速专用集成电路重点实验室基金 (批准号: 51432010204Jw1401) 和国家自然科学基金 (批准号: NSFC60536030) 资助项目

† 通信作者. Email: wangweiw33@yahoo.com.cn

2007-09-29 收到, 2007-12-03 定稿

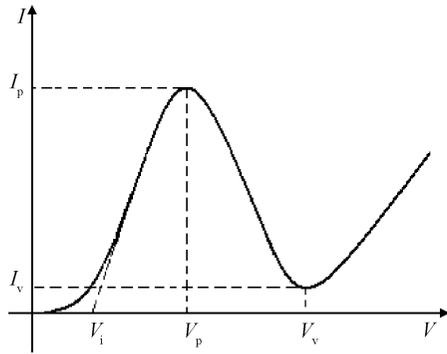


图 1 RTD 的 $I-V$ 特性
Fig.1 RTD $I-V$ characteristics

$$V_p = \frac{2E_0}{q} \quad (7)$$

现在考虑发射区存在电子积累层、集电区存在电子耗尽层,同时又有 R_s 和外接串联电阻 R_{ex} 的情况.由于上述各项都是串联的,故有:

$$V_p = \frac{E_{acc} + E_{dep}}{q} + \frac{2E_0}{q} + \frac{Q_m}{C} + IR_s + IR_{ex} \quad (8)$$

式中 $\frac{E_{acc}}{q}, \frac{E_{dep}}{q}, IR_s, IR_{ex}$ 分别表示在峰值状态下电子积累层、电子耗尽层、串联电阻 R_s 和外加电阻 R_{ex} 上的压降.(8)式是考虑了几乎所有的因素后峰值电压 V_p 的表达式.公式(5)表示,影响 Q_m 值的都是 RTD 的本征因素,此外当 RTD 达到峰值状态时,(8)式中 E_{acc} 和 E_{dep} 将固定于一定值.所以对于某一 RTD,当其达到峰值状态时,(8)式等号右方前三项趋于一定值,不因电流 I

和外加电阻 R_{ex} 的大小而改变,从后面实测数值也可以证明这一结论.

3 RTD 串联电阻 R_s 测量原理

当 RTD 上串联一个外加电阻 R_{ex} 时,根据(8)式其 V_p 将增大,利用(8)式即可求出 RTD 本身串联电阻 R_s 的值,由于(8)式等号右侧前三项不随 R_{ex} 而改变.现设:

$$\frac{E_{acc} + E_{dep}}{q} + \frac{2E_0}{q} + \frac{Q_m}{C} = V_i \quad (9)$$

而且与 V_p 相对应的电流 I 定义为峰值电流 I_p ,则:

$$V_p = V_i + I_p(R_s + R_{ex}) \quad (10)$$

又因 V_i 不随电流 I 而改变,故可写成:

$$V = V_i + I(R_s + R_{ex}) \quad (11)$$

从(11)式可知, V_i 为 $I = 0$ 时对应的外加偏压,如图 1 所示.故通过(11)式可求得 V_i ,再从(10)式求出 R_s ,具体的测量程序为:

(1) 将待测 R_s 的 RTD 串联一个外接电阻 R_{ex} ,可用一电阻箱替代外接电阻.

(2) 改变 R_{ex} 值,用晶体管特性图示仪测量其 $I-V$ 特性.读出对应的 V_i, V_p 等负阻参数.

(3) 代入(10)式即可得到 R_s ,可将(10)式写成:

$$R_s = \frac{V_p - V_i}{I_p} - R_{ex} \quad (12)$$

(4) 最后求 R_s 的平均值作为待测 RTD 的串联电阻值.

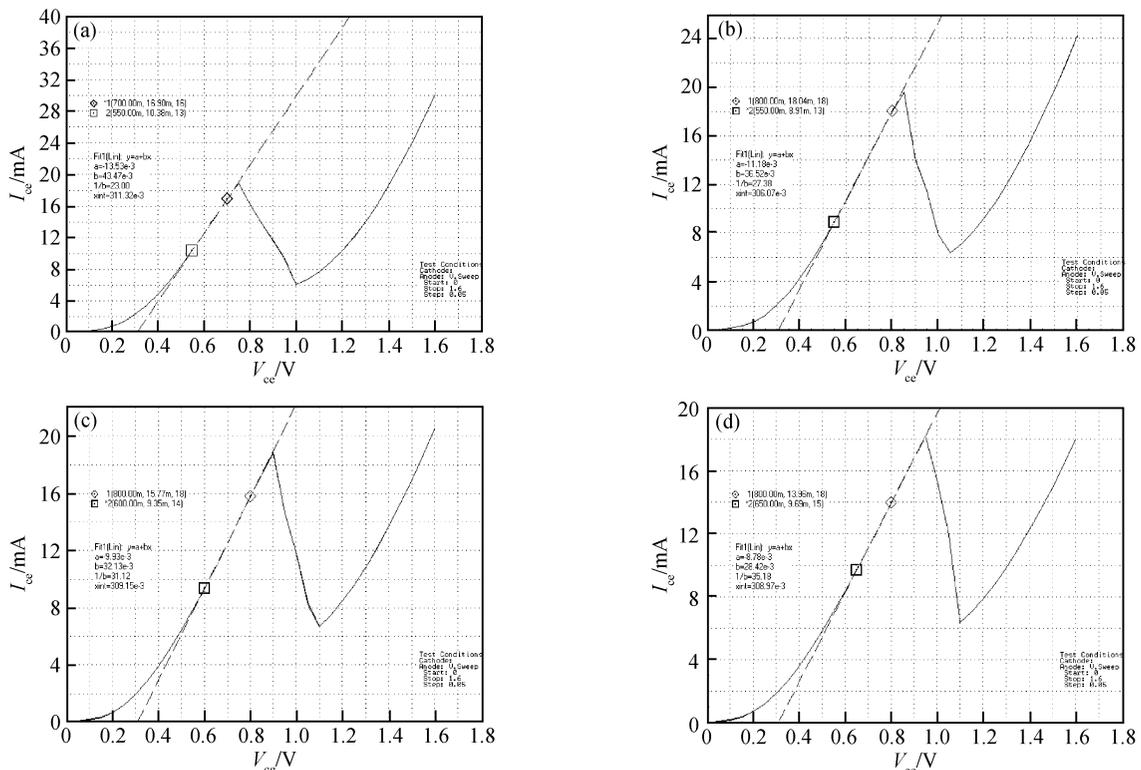


图 2 室温下外接不同 R_{ex} 时待测 RTD 的 $I-V$ 特性 (a) $R_{ex} = 0\Omega$; (b) $R_{ex} = 4\Omega$; (c) $R_{ex} = 8\Omega$; (d) $R_{ex} = 12\Omega$

Fig.2 $I-V$ characteristics of RTD at room temperature with different R_{ex} (a) $R_{ex} = 0\Omega$; (b) $R_{ex} = 4\Omega$; (c) $R_{ex} = 8\Omega$; (d) $R_{ex} = 12\Omega$

表 1 室温下待测 RTD ($A_E = 6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$) 不同 R_{ex} 时各参数数值
Table 1 Parameter values of RTD ($A_E = 6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$) at room temperature for different R_{ex}

R_{ex} / Ω	V_i / mV	V_p / mV	I_p / mA	V_v / mV	I_v / mA	$(V_p - V_i)$ / mV	R_s / Ω
0	311	750	18.87	1000	6.04	439	23.3
2	309	800	18.18	1050	6.54	491	25.0
4	306	850	19.56	1050	6.34	544	23.8
6	305	850	18.48	1050	6.19	545	23.5
8	309	900	18.84	1100	6.68	591	23.4
10	306	950	19.16	1050	5.95	644	23.6
12	309	950	18.18	1100	6.36	641	23.3
14	312	1000	18.52	1100	6.2	688	23.2
16	311	1050	18.83	1100	6.07	739	23.2
18	308	1100	19.09	1100	6.47	792	23.5
20	308	1150	19.31	1150	6.32	842	23.6
22	307	1200	19.51	1150	6.2	893	23.8
24	305	1200	18.81	1150	6.08	895	23.6
26	309	1250	19.03	1150	5.98	941	23.4
28	309	1300	19.24	1150	6.32	991	23.5
30	309	1300	18.58	1200	6.2	991	23.3
35	309	1450	19.46	1200	5.95	1141	23.6
40	305	1550	19.5	1250	6.1	1245	23.8
45	306	1650	19.53	1300	6.21	1344	23.8
50	305	1750	19.55	1300	6.03	1445	23.9

4 RTD 串联电阻 R_s 测量举例

待测 RTD 为 AlAs/GaAs/InGaAs 材料体系, 器件发射极面积为 $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$. 图 2 给出用 4200 Keithley Semiconductor Characterization System 在室温和不同外接电阻 R_{ex} 情况下得到的待测样管的 $I-V$ 特性. 从图中可明显地看出, 随着 R_{ex} 的增加, 峰值点右移, V_p 增大, 同时 V_i, I_p, I_v 变化很小的情况.

表中的 R_s 是由(12)式计算的. 从表 1 可以看出在 R_{ex} 从 0 到 50Ω 变化范围内, 所测得的 R_s 值一致性相当好, 其平均值 $\bar{R}_s = 23.6\Omega$ 与最小值 23.2Ω 的偏差为 1.7%, 与最大值 25.0Ω 的偏差为 5.9%.

5 用不同温度 $I-V$ 特性测 R_s 法对此法的校准

文献[2]提出的测 R_s 方法通常是测绘出不同温度下 RTD 的 $I-V$ 特性, 求出 R_s 的平均值. 但从(1)式可

以看出针对某一个温度 T (如 $T = 300\text{K}$, 此时 $kT/q = 0.0259\text{V}$) 仍可用该法求出 R_s , 现用(1)式核准上述 R_{ex} 法测量结果, 从图 2(a) $R_{\text{ex}} = 0\Omega$ 的 $I-V$ 特性曲线第二正阻区 (请参阅文献[2], 该法公式推导基于第二正阻区) 近于直线部分, 选取两个不同电流值 $I_D = 12\text{mA}$ 和 $I_D = 16.2\text{mA}$, 求出与两个电流值所对应的切线斜率 $\left(\frac{\Delta V}{\Delta I}\right)_{I_D = 12\text{mA}} = 27.5\Omega$ 和 $\left(\frac{\Delta V}{\Delta I}\right)_{I_D = 16.2\text{mA}} = 21.9\Omega$, 再代入:

$$R_s = R_T \left(= \frac{\Delta V}{\Delta I} \right) - \left(\frac{kT}{q} \right) \times \frac{1}{I_D} \quad (13)$$

最后得到 $R_{s1} = 25.3\Omega$ 和 $R_{s2} = 20.3\Omega$, 其平均值 $\bar{R}_s = 22.8\Omega$. 与上述 R_{ex} 法误差为 3.5%.

上述的两种方法, 一个以 V_p 和 R_s, R_{ex} 的依赖关系为基础; 另一个以 $I-V$ 特性的第二正阻区斜率与 T 和 R_s 的关系为基础. 这两个基础不同的测 R_s 的方法校准误差为 3.5%, 是很难得的.

6 结论

(1) 从表 1 所测的结果可清楚地证明在所选的 R_{ex} 范围 V_i 值以及 I_p, I_v 参数基本不随 R_{ex} 和 R_s 而改变, 故证实本测量方法的理论依据是可靠的.

(2) 表 1 给出的实测 R_s 值的一致性是相当高的, 至少比不同温度 $I-V$ 特性斜率法一致性好很多, 另外也不需要变温测量, 故为一种快速、便捷的 RTD 串联电阻 R_s 的测量方法.

参考文献

- [1] Guo Weilian. Device parameters and measurement method of RTD. *Micronanoelectronic Technology*, 2006, 43(12): 564 (in Chinese) [郭维廉. RTD 器件参数和测量方法. *微纳电子技术*, 2006, 43(12): 564]
- [2] Deen M J. Simple method to determine series resistance and its temperature dependence in AlAs/GaAs/AlAs double barrier resonant tunneling diodes. *Electron Lett*, 1992, 28(13): 1195
- [3] Sheard F W, Toombs G A. Space-charge buildup and bistability in resonant-tunneling double-barrier structures. *Appl Phys Lett*, 1998, 52(15): 1228
- [4] Guo Weilian. Electric charge accumulation effect in RTD. *Micronanoelectronic Technology*, 2006, 43(4): 172 (in Chinese) [郭维廉. 共振隧穿二极管中电荷积累效应. *微纳电子技术*, 2006, 43(4): 172]

A New Method for Measuring Series Resistance of RTDs^{*}

Guo Weilian^{1,2}, Song Ruiliang², Wang Wei^{1,†}, Yu Xin¹, Niu Pingjuan¹,
Mao Luhong², Zhang Shilin², and Liang Huilai²

(1 *School of Information and Communication, Tianjian Polytechnic University, Tianjin 300160, China*)

(2 *School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: According to the relation among peak voltage V_p , series resistance R_s , and external resistance R_{ex} , a novel method for measuring the series resistance R_s of RTDs is proposed. The experimental result demonstrates that this method is accurate, simple, convenient, and quick. The derivation of the relation among V_p , R_s , and R_{ex} , the principle of R_s measurement, the measured result of R_s , and a comparison between this method and other measurement methods are illustrated in detail.

Key words: parameters of RTD; measurement method of series resistance; the expression of RTD performance

EEACC: 2560X; 2560Z; 2560H

Article ID: 0253-4177(2008)05-0950-04

^{*} Project supported by the Fund of National Key Laboratory of Super High ASIC (No. 51432010204Jw1401) and the National Natural Science Foundation of China (No. 60536030)

[†] Corresponding author. Email: wangweiw33@yahoo.com.cn

Received 29 September 2007, revised manuscript received 3 December 2007

©2008 Chinese Institute of Electronics