

# 基于共振隧穿二极管的应力检测方法\*

熊继军<sup>1,†</sup> 毛海央<sup>1,2</sup> 张文栋<sup>1</sup> 薛晨阳<sup>1</sup>

(1 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 电子测试技术国防重点实验室, 太原 030051)

(2 北京大学微电子研究所, 北京 100871)

**摘要:** 共振隧穿二极管(RTD)具有微分负阻效应,且其共振隧穿的  $I-V$  特性随着应力的变化而变化,这就是 RTD 的压阻效应.与半导体材料压阻效应的应用类似,RTD 也可用于应力检测.文中研究了两种基于 RTD 的应力检测方法.在讨论频率-应力检测法的基础上提出了一种新颖的应力检测方法——惠斯通 RTD 电桥检测法.测试结果表明,基于惠斯通 RTD 电桥检测法得到的压阻灵敏度随偏置电压可调,可调范围达到三个数量级.

**关键词:** 共振隧穿二极管; 应力检测; 振荡频率;  $I-V$  特性; 压阻灵敏度

EEACC: 6520

中图分类号: TN307 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2008)02-0324-05

## 1 引言

将被测物理参量转化为机械结构的应力,通过对应力的检测进而实现对被测物理参量的标定,这是许多传感器通常采用的检测原理.在 MEMS 力电转换类传感器(如微加速度计<sup>[1]</sup>、微压力传感器<sup>[2]</sup>、微声传感器<sup>[3]</sup>等)中同样如此,先将被测物理参量(如加速度、压力、声压等)转化为结构应力,然后利用压阻效应或压电效应检测微结构中的应力,最终实现力学物理参量的标定.

RTD 具有微分负阻效应<sup>[4~8]</sup>,且其共振隧穿的  $I-V$  特性随着应力的变化而变化<sup>[9,10]</sup>.如果能在微传感器结构中检测出这种变化,则一种新颖的、不同于半导体压阻效应的应力检测方法就能用于实际测量中,进而为力-电转换类微传感器的设计提供一种新的思路.

本文以带有 GaAs/AlAs/InGaAs 双势垒 RTD 的微梁-质量块结构为研究对象,分别研究了两种应力检测方法.在 Mutamba 等人<sup>[11,12]</sup>的研究基础上分析了频率-应力检测法的检测原理,利用喇曼光谱分析仪等设计了应力检测实验系统.此外,本文又提出了一种新颖的应力检测方法——惠斯通 RTD 电桥检测法,并搭建了基于惠斯通 RTD 电桥的应力检测实验系统.最后,由实验结果分析了基于 RTD 的应力检测灵敏度.

## 2 实验结构设计

本文以四边梁-质量块结构为研究对象,其中梁长、梁宽和梁厚分别为  $l$ ,  $b$  和  $h$ .分析可知,当结构承受压力或加速度载荷时,每根梁的两端都处在大小相等、方向相反的应力区域内,且靠近梁端部的纵向应力和横向应力都最大.为了有效利用外加压力或加速度载荷引起

的应力,采用分子束外延(MBE)设备,在 4 根梁的根部分别生长 4 个 RTD 结构.四边梁-质量块结构及其上 RTD 的分布如图 1 所示,其中 RTD 的材料结构和尺寸如图 2 所示.

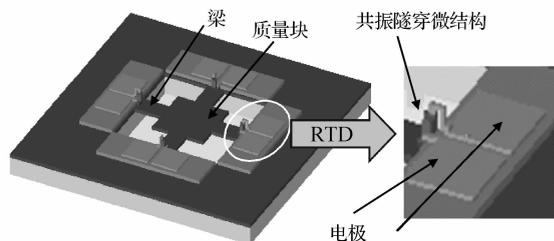


图 1 梁-质量块结构和 RTD 分布图  
Fig. 1 Beam-mass structure and RTD distributions

$n^+$ -GaAs	$3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	500nm
$n^+$ -GaAs	$10^{17} \text{cm}^{-3}$	10nm
GaAs	undoped(UD)	5nm
$\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$	UD	5nm
GaAs	UD	0.5nm
AlAs	UD	1.7nm
GaAs	UD	0.5nm
$\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$	UD	4nm
GaAs	UD	0.5nm
AlAs	UD	1.7nm
GaAs	UD	0.5nm
$\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$	UD	5nm
GaAs	UD	5nm
$n^+$ -GaAs	$10^{17} \text{cm}^{-3}$	10nm
$n^+$ -GaAs	$3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	500nm
GaAs	UD	1000nm
SI-GaAs substrate		

图 2 共振隧穿结构与材料尺寸  
Fig. 2 Material and dimensions of RTD

\* 国家自然科学基金(批准号:50775209),霍英东教育基金(批准号:101052)和新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET-04-0259)资助项目

† 通信作者. Email: xiongijun@nuc.edu.cn

2007-06-08 收到,2007-10-16 定稿

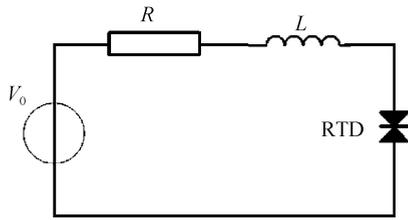


图 3 共振隧穿振荡器的原理图  
Fig.3 Schematic of the oscillator circuit

### 3 应力检测方法

#### 3.1 频率-应力检测法

当偏置电压处于 RTD 负阻区对应偏压范围内时, RTD 将发生一定频率的自激振荡<sup>[11]</sup>. 经过适当的信号调理电路, 可以直接输出频率信号. 研究发现, 在外加压力的作用下, RTD 结构的振荡频率会发生变化. 因此, 可以根据频率信号与外加压力之间的对应关系实现应力的检测.

##### 3.1.1 振荡器的组成与分析

根据发射极量子阱费米能级与主量子阱共振能级之间的关系, RTD 可以等效为由本征微分负电导、等效串联电感、本征电容及串联电阻(包括引线电阻、欧姆接触和晶片的扩展电阻)共同组成的电学模型<sup>[13]</sup>. 将 RTD 结构和稳压电源、串联电感、串联等效电阻等相连即可组成如图 3 所示的振荡电路. RTD 自激振荡的振荡频率由偏置电压、电感、串联等效电阻及 RTD 结构的  $I-V$  特性共同决定. 图 4 中箭头指示的是一个振荡周期内 RTD 的电流-电压变化情况, 电压的变化过程为  $D \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ .

由图 4 可知, 从 D 点开始, 当 RTD 两端的偏置电压逐渐增大时, 电流也逐渐增大直到峰值 A 点; 由于负阻区的存在, 当电压继续增大, 电流会有一个突变, 由于串联电感具有阻碍电流突变的作用, 瞬间增大的电流值会对电容 C 充电, 使得 RTD 两端的电压瞬间增大, 产生从 A 点到 B 点的跳变; 因为 B 点的电压值超过了偏置电压, 因而不能长久保持, 于是在一定时间内电压又会降到 C 点(时间由电感值和 RTD 正阻区的电阻值决定), 在这个过程中电容处于放电状态; 当降到谷值 C

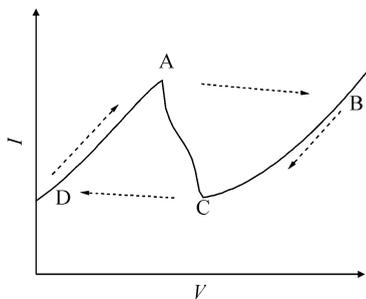


图 4 RTD 结构的  $I-V$  特性及振荡电压、电流的变化过程  
Fig.4  $I-V$  excursion of RTD in an oscillation cycle

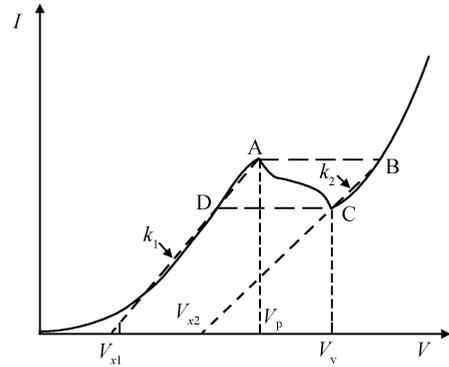


图 5 共振隧穿微结构正电阻区的线性近似  
Fig.5 Linear approximation of the positive resistance regions

点时, 电容继续放电, 而电流保持不变, 因此电压跳到 D 点, 完成一个振荡周期.

##### 3.1.2 振荡频率的解算

忽略 RTD 等效电路中寄生电容对振荡频率的影响, 由图 3 得到振荡电路的回路微分方程为

$$V_0 = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} + v_d \quad (1)$$

其中  $i_d$  为回路电流;  $v_d$  为 RTD 两端的电压. 为了便于分析, 将 RTD 正电阻区的  $I-V$  特性曲线近似为一次函数曲线, 并设斜率分别为  $k_1$  和  $k_2$ , 如图 5 所示.

根据 Mutamba 等人的研究<sup>[11,12]</sup>, 振荡电路的振荡周期为

$$t = k_1 L \left[ \ln \left( \frac{V_D - Rk_1 V_{x1} - V_0}{V_p - Rk_1 V_{x1} - V_0} \right) \right] + k_2 L \left[ \ln \left( \frac{V_B - Rk_2 V_{x2} - V_0}{V_v - Rk_2 V_{x2} - V_0} \right) \right] \quad (2)$$

由 (2) 式可知, 振荡频率反比于电感值  $L$ ; 当偏置电压  $V_0$  从  $(V_p - Rg_1 V_{x1})$  到  $(V_v - Rg_2 V_{x2})$  变化时, 可以得到最大振荡频率; 由于串联等效电阻  $R$  阻值很小, 因此设  $Rg_i V_{xi}$  相比于  $V_p$  和  $V_v$  很小, 于是  $V_0$  直接在  $V_p$  和  $V_v$  之间变化, 当  $V_0$  接近负阻区的边缘  $V_p$  或  $V_v$  时, 振荡频率将降为零. 当外加压力作用于 RTD 时, 峰值/谷值电流的变化会引起峰值/谷值电压的漂移. 在偏压  $V_0$  一定时, 峰/谷电压的漂移效果相当于峰/谷电压不变时改变偏压  $V_0$  产生的效果.

Mutamba 等人利用频率-应力检测法实现的微压力传感器在 113kHz 稳定振荡时, 应力检测灵敏度达到最大, 其值为 0.8kHz/MPa.

#### 3.2 惠斯通 RTD 电桥检测法

##### 3.2.1 电桥电路的设计

取梁根部一个 RTD 作为惠斯通电桥某一桥臂上的应变电阻, 与另外 3 个电阻构成惠斯通电桥, 电路连接如图 6 所示. 当梁-质量块结构承受加速度载荷时, RTD 的阻值发生变化. RTD 阻值的变化使惠斯通电桥由平衡状态变化到不平衡状态, 进而使电桥的输出电压发生变化. 根据输出电压与加速度载荷(量值由测试系统给出)之间的关系, 可以实现应力检测.

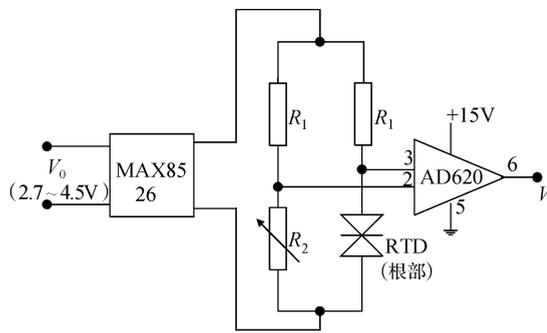


图 6 惠斯通 RTD 电桥检测电路原理框图

Fig.6 Schematic of the RTD-Wheatstone bridge circuit

### 3.2.2 惠斯通 RTD 电桥检测法压阻灵敏度的解算

设电路输出电压为  $V_0$ , 输出电压为  $V$ , 放大电路的放大倍数为  $G$ , 则输出电压可表示为

$$V = \left( \frac{R_x}{R_1 + R_x} V_0 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_0 \right) G \quad (3)$$

初始条件下, 调节可变电阻  $R_2 = R_x$ , 使电桥平衡, 输出电压  $V = 0$ . 当结构承受加速度载荷时, RTD 的阻值发生变化, 设阻值变化量为  $\Delta R_x$ , 则输出电压可表示为

$$V = \left( \frac{R_x + \Delta R_x}{R_1 + R_x + \Delta R_x} V_0 - \frac{R_x}{R_1 + R_x} V_0 \right) G \quad (4)$$

由于串联电阻  $R_1$  直接影响 RTD 负阻区的下降坡度, 此处取  $R_1 = 1\Omega$ . 由于  $R_1$  的值远小于  $\Delta R_x$ , 于是介观压阻灵敏度  $K = \frac{\Delta R_x}{R_x \sigma}$  近似为

$$K \approx C \frac{V/G}{V_0 \sigma} \quad (5)$$

其中  $\sigma$  表示由加速度载荷引起的应力;  $C$  为数值等于  $R_x$  的系数, 无量纲. 因此, 在进行灵敏度标定时, 需要将加速度载荷转换为应力值. 对于图 1 所示的四边梁-质量块结构, 梁根部的应力值近似为<sup>[13,14]</sup>

$$\sigma_{\text{Max}} = \frac{3mal}{2bh^2} \quad (6)$$

其中  $a$  表示加速度载荷. 由于共振隧穿微结构 (RTS) 的尺寸非常小, 可以将其近似为一个点. 因此 RTD 所在位置的最大应力也由 (6) 式确定. 由此可知, 如果得到特定加速度载荷下的输出电压  $V$ , 则可得到加速度测试灵敏度、应力测试灵敏度和压阻灵敏度.

## 4 应力检测实验

### 4.1 频率-应力检测法的实验测试

为了测试应力与 RTD 的  $I-V$  曲线漂移特性及与振荡频率的关系, 设计了探针加压实验系统, 如图 7 所示. 实验系统由激光喇曼光谱仪显微应力标定系统、探针加压装置、Aglient 4156C 半导体特性分析仪、频率测试电路及示波器等组成.

实验时, 将探针加压装置放于喇曼光谱仪的三轴平台上, 用其对质量块施加  $z$  轴向压力. 探针每施加一次

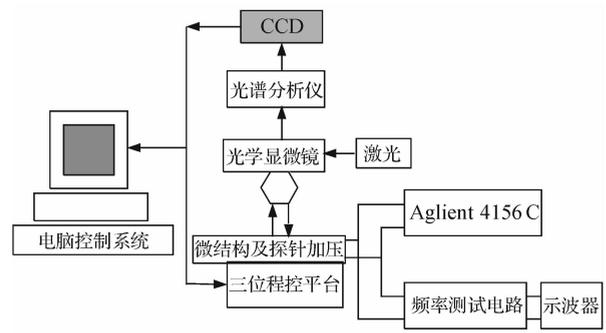


图 7 探针加压实验原理图

Fig.7 Schematic of pressure-loading experiment system

压力, 用喇曼光谱仪对结构中一个 RTD 所在位置的应力进行一次标定; 随后用半导体特性分析仪进行一次  $I-V$  特性曲线的测试, 为了避免喇曼激光对 RTD 电学特性造成影响, 在应力标定完成 (喇曼激光关闭) 之后一段时间再进行  $I-V$  特性测试; 用频率测试电路对 RTD 结构加负阻区域内的电压使之发生振荡, 并测试振荡频率. 最后得到不同应力条件下, RTD 结构的振荡频率值及其线性拟合曲线, 如图 8 所示. 实验中, 示波器用于监测振荡信号.

### 4.2 惠斯通 RTD 电桥检测法的实验测试

惠斯通 RTD 电桥检测应力的实验系统由振动台及其计算机系统、电桥测试电路、示波器和信号记录设备组成. 实验时, 用高强度双面胶将微结构粘在振动台台面上, 通过计算机系统设置振动台的参数使其进行正弦定频振动, 由测试电路进行信号处理及电压输出, 用示波器显示输出信号, 并用信号记录设备记录输出信号, 用于数据处理与分析. 首先在无外加载荷时测试 RTD (与频率应力检测法中所用的 RTD 为同一个) 的  $I-V$  特性曲线, 并由其得到 RTD 在无载荷情况下的电阻-偏压曲线, 如图 9 所示.

调节稳压电源的输出使微结构上的 RTD 稳定在负阻区 (非平台区, 如  $V_0 = 0.623\text{V}$ ,  $R_x = 55.643\Omega$ ), 调节电桥平衡, 电路输出电压为零; 固定振动台正弦激励信号的频率 (如  $320\text{Hz}$ ), 在不同加速度载荷下检测输出电压信号. 在得到输出电压与加速度载荷关系曲线的基础

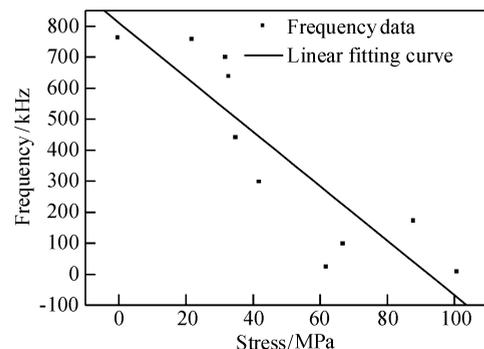


图 8 振荡频率与应力的关系

Fig.8 Oscillation frequency versus stress and its fitting curve

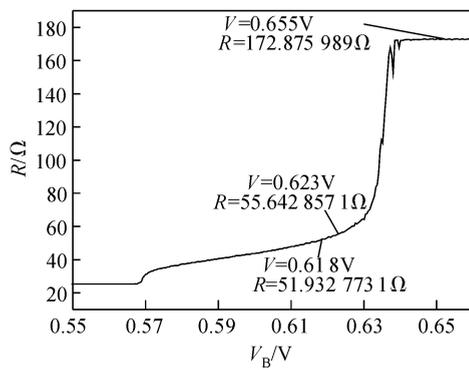


图 9 无载荷时 RTD 的电阻-偏压曲线  
Fig. 9 Resistance versus bias voltage

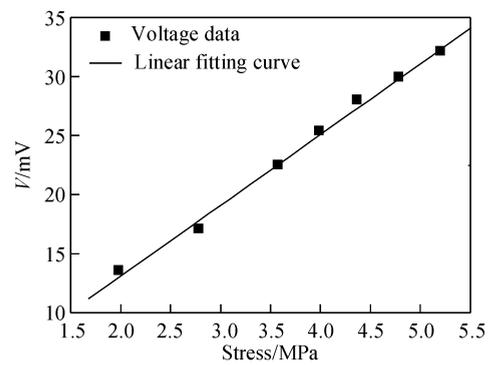


图 12 非负阻区内不同应力对应的输出电压  
Fig.12 Voltages versus stress (beyond NDR region)

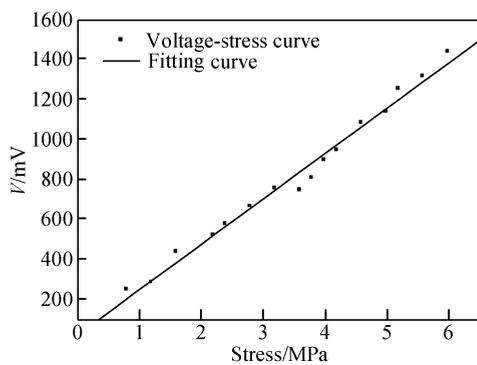


图 10 不同应力值对应的输出电压  
Fig.10 Voltages versus stress (within NDR region)

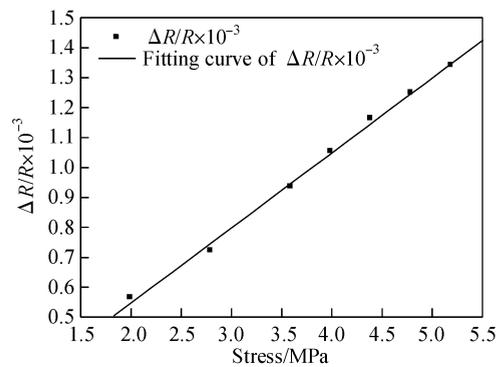


图 13 电阻变化率与应力的关系  
Fig.13 Relative resistance variation versus stress

上,得到惠斯通电桥检测法的加速度检测灵敏度达到 90.51mV/g.根据(6)式将加速度载荷值转换为应力值,得到输出电压与应力之间的关系曲线如图 10 所示,得到应力检测灵敏度达到 226.74mV/MPa.由(5)式得到  $\frac{\Delta R}{R} = C \frac{V}{GV_0}$ ,其中  $C$  在数值上与  $R_x$  相等.于是,

可以得到电阻变化率与外加应力之间的关系,如图 11 所示,由图 11 得到压阻灵敏度为  $4.218 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ .

当调节偏置电压使 RTD 结构位于非负阻区域(如  $V_0 = 0.748\text{V}$ ,  $R_x = 150.120\Omega$ )时,得到非负阻区域内的加速度检测灵敏度为 2.39mV/g.转换为输出电压和应力之间的关系,如图 12 所示;同时得到应力检测灵敏度为 5.99mV/MPa;得到电阻变化率与应力之间的关系

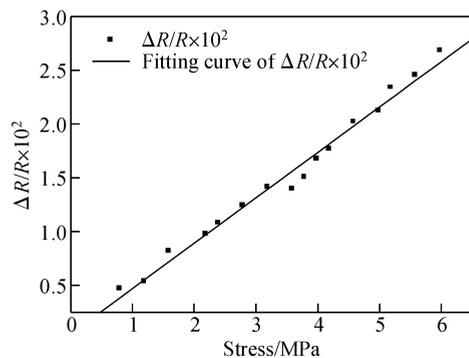


图 11 电阻变化率与应力的关系  
Fig.11 Relative resistance variation versus stress

曲线如图 13 所示.由图 13 得到压阻灵敏度为  $2.502 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ .同理,改变偏置电压,得到了对应于不同偏置电压的压阻灵敏度如图 14 所示.

## 5 结果与分析

从图 8 中可以看出,RTD 结构的振荡频率随着应力的增大呈减小趋势.由拟合曲线可知,采用频率检测法得到的应力检测灵敏度达到 8.7835kHz/MPa.然而,RTD 结构的负阻区存在平台结构、双稳态现象,且应力

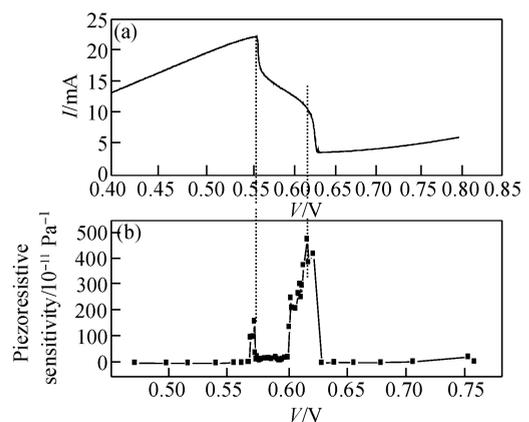


图 14 (a) RTD 的  $I-V$  特性; (b) RTD 压阻灵敏度与偏置电压的关系  
Fig.14 (a)  $I-V$  curve of RTDs; (b) Piezoresistive sensitivity versus bias voltage of RTDs

的作用将引起量子阱中电荷的积累,此外在量子阱中不可避免地存在杂质散射.这些因素都将引起负阻区的不稳定性,从而影响振荡频率的稳定性.从图 14 中可以看出,当偏置电压处于 RTD 的负阻区域内时其对应的压阻灵敏度要高于非负阻区域偏压对应的压阻灵敏度,其最大值达到  $4.782 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$  (对应偏压为 0.618V),该压阻灵敏度比最小压阻灵敏度  $7.557 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$  (对应偏压为 0.755V) 大两个数量级.因此,采用电桥检测法检测应力时具有灵敏度可调性质,调节范围高达 3 个数量级,而对应于某一特定的偏置电压,其灵敏度固定.具有这种灵敏度可调性质的力学传感器,可以提高其在固定偏压处的信噪比,对于输出信号非常微弱的微机械传感器而言,这种性质显得尤为重要.

## 6 结论

本文分析了频率-应力检测法并提出了惠斯通 RTD 电桥检测法.由实验测试结果可知,频率-应力检测法的应力检测灵敏度达到  $8.7835 \text{ kHz/MPa}$ .基于惠斯通 RTD 电桥的应力检测法可以实现 RTD 的压阻灵敏度在 3 个数量级范围内可调.

### 参考文献

- [1] Suminto T. A simple high performance piezoresistive accelerometer. 7th Int Conf Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '91), San Francisco, CA, USA, 1991; 104
- [2] Monk D J, Shah M K. Packaging and testing considerations for commercialization of bulk micromachined piezoresistive pressure sensors. Proc Commercialization of Microsystems, 1996; 136
- [3] Schellin R, Hess G. A silicon subminiature microphone based on piezoresistive polysilicon strain gauges. Sensors and Actuators A, 1992, 32(1~3); 555
- [4] Chang L L, Esaki L, Tsu R. Resonant tunneling in semiconductor double barriers. Appl Phys Lett, 1974, 24(12); 593
- [5] Mao Haiyang, Xiong Jijun, Zhang Wendong, et al. Piezoresistive properties of resonant tunneling diodes. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(10); 112 (in Chinese) [毛海央, 熊继军, 张文栋, 等. 共振隧穿二极管的压阻特性测试与研究. 半导体学报, 2006, 27(10); 112]
- [6] Srikar V T, Swan A K, Unlu M S, et al. Micro-Raman measurement of bending stress in micromachined silicon flexures. J Microelectromechanical Systems, 2003, 12(6); 779
- [7] Helmy A S, Bryce A C, Ironside C N, et al. Raman spectroscopy for characterising compositional intermixing in GaAs/AlGaAs heterostructures. Appl Phys Lett, 1999, 74; 3978
- [8] Fobeletz K, Vounckx R, Borghsz G, et al. A GaAs pressure sensor based on resonant tunnelling diodes. J Micromech Microeng, 1994, 4; 123
- [9] Brown E R, Söderström J R, Parker C D, et al. Oscillations up to 712GHz in InAs/AlSb resonant tunnelling diodes. Appl Phys Lett, 1991, 58; 2291
- [10] Zhao P J, Cui H H, Woolard D L, et al. Equivalent circuit parameters of resonant tunneling diodes extracted from self-consistent Wigner-Poisson simulation. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48(4); 614
- [11] Mutamba K, Flath M, Sigurdardóttir A, et al. A GaAs pressure sensor with frequency output based on resonant tunneling diodes. IEEE Trans Instrumentation and Measurement, 1999, 48(6); 1333
- [12] Wen Tingdun, Xu Liping, Xiong Jijun, et al. The meso-piezo-resistive effects in MEMS/NEMS. Solid State Phenomena, 2007, 121~123; 619
- [13] Mao Haiyang. Analysis on error mechanism of micro piezoresistive accelerometers. Master's Degree Dissertation, Taiyuan: North University of China, 2007 (in Chinese) [毛海央. 压阻式微加速度的误差机理分析. 硕士学位论文, 太原: 中北大学, 2007]
- [14] Li Kejie. New sensor technology handbook. Beijing: National Defence Industry Press, 2002; 445 (in Chinese) [李科杰. 主编. 新编传感器技术手册. 北京: 国防工业出版社, 2002; 445]

## Resonant Tunneling Diode Based Stress Measurement \*

Xiong Jijun<sup>1,†</sup>, Mao Haiyang<sup>1,2</sup>, Zhang Wendong<sup>1</sup>, and Xue Chenyang<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement of the Ministry Education, Key Laboratory of the Electronic Measurement Technology of the National Defense, North University of China, Taiyuan 030051, China)

(2 Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The output characteristics of InGaAs/AlAs resonant tunneling diodes (RTDs) changes as a function of external stress, and this meso-piezoresistive effect can be used to measure stress. In this paper, two RTD-based strategies to measure stress, resonance frequency measurement and RTD-Wheatstone bridge measurement, are discussed. The experimental results show that the piezoresistive sensitivity of the RTD-Wheatstone bridge can be configured within a range of 3 orders with different bias voltages, and the maximum piezoresistive sensitivity is  $4.782 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ .

**Key words:** current-voltage characteristic; oscillation frequency; piezoresistive sensitivity; resonant tunneling diode; stress measurement

EEACC: 6520

Article ID: 0253-4177(2008)02-0324-05

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50775209), the Fork Ying Tung Education Foundation (No. 101052) and the Program for Excellent Talents by Ministry of Education (No. NCET-04-0259)

† Corresponding author. Email: xiongjijun@nuc.edu.cn

Received 8 June 2007, revised manuscript received 16 October 2007