

共振隧穿二极管的压阻特性测试与研究*

毛海央[†] 熊继军 张文栋 薛晨阳 桑胜波 鲍爱达

(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)

摘要: 设计并搭建了检测共振隧穿二极管(RTD)压阻特性的实验系统,测试了 RTD 结构在不同应力状态下 $I-V$ 特性曲线的漂移.实验结果表明 RTD 结构压阻特性的灵敏度大于 $1 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$.为了更精确地定量表达其压阻特性,研究了同一 RTD 结构 $I-V$ 特性的一致性,得到相同环境条件下 RTD 电阻的最大相对漂移量小于 3%,其中 1%由测试仪器造成.

关键词: 共振隧穿二极管; 压阻特性; 一致性; 灵敏度; 喇曼光谱
EEACC: 2560

中图分类号: TN307 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2006)10-1789-05

1 引言

自首次观测到双势垒量子阱结构中的微分负阻^[1]以来,对共振隧穿二极管(RTD)的研究已经持续了 20 多年. RTD 因其具有响应速度快、工作频率高、电压低、功耗低和多功能等特点被广泛应用于数字逻辑电路、模拟电路、信号处理和模-数转换电路及微波中^[2~5]. 这些方面研究运用的都是 RTD 的负阻特性. 而本文却从 RTD 的另一重要性质——压阻特性^[6]着手,研究了 RTD 实现力-电转换的能力.

基于共振隧穿效应的 RTD 是一种双势垒量子阱结构,它具有压阻效应. 从量子理论方面解释,其原理可描述为:在力学信号的作用下,量子阱薄膜结构(即 RTD 结构)中的应力分布会发生变化,应力分布的变化将产生内建电场,而内建电场会导致结构中量子能态发生变化,从而引起共振隧穿电流的变化. 简言之,外加的力学信号会引起 RTD 结构 $I-V$ 特性曲线的变化,当偏置的共振隧穿电压固定时,力学信号和隧穿电流之间的关系就可以等效为力学信号与电阻变化量之间的关系^[7,8]. 研究发现,RTD 结构的压阻特性受温度的影响较硅压阻特性小,其灵敏度比硅压阻灵敏度的最大值要高 5~6 倍^[9,10].

为了定量表达 RTD 结构的压阻特性,本文设计并搭建了一个测量 GaAs 基 RTD 结构压阻特性的测试系统,测试了 RTD 结构的压阻特性,分析了它的灵敏度. 此外,为了更加精确地定量表达压阻特

性,本文还对相同测试环境中同一个 RTD 结构的电阻一致性问题进行了研究.

2 测试样品制备

采用分子束外延(MBE)设备,在 GaAs 衬底上成功生长了 RTD 材料,其核心是 AlAs/GaAs/In_{0.1}-Ga_{0.9}As/GaAs/AlAs 双势垒单量子阱系统,其材料结构和尺寸如图 1 所示. 再采用传统的腐蚀工艺得到 RTD 结构. 设计过程中,在发射极区和集电极区

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

图 1 AlAs/GaAs/InGaAs 多量子阱结构
Fig.1 GaAs based AlAs/GaAs/InGaAs quantum well structure

* 国家自然科学基金(批准号:50405025,50375050)和霍英东基金(批准号:01052)资助项目

[†] 通信作者. Email: maohaiyang1982@126.com

2006-03-20 收到,2006-04-24 定稿

隔离层中各增加一层 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, 其目的是降低峰值电压, 提高峰谷比, 并尽量缩小发射极面积, 减小其本征电容. 此外, 为了减少寄生电容, 消除边缘问题, 采用了双空气桥技术引出 RTD 的两个电极, 即发射极和集电极都通过空气桥与缓冲层上的突台相连. 图 2 所示为该双空气桥 RTD 结构的 SEM 图. 为了排除封装对结构压阻特性的影响, 测试中采用的均为未封装的 RTD 结构.

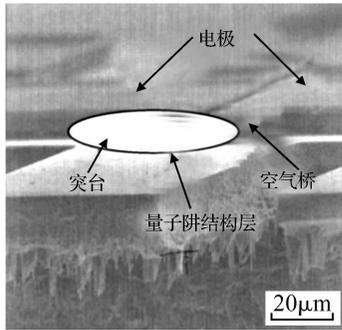


图 2 双空气桥 RTD 结构 SEM 照片

Fig. 2 SEM photograph of a fabricated double-air-bridging based RTD

3 测试方案

由于所测试的 RTD 是一种双垒单阱薄膜结构, 它在一定的偏压范围内会发生共振隧穿, 且隧穿电流又随着外加偏压的变化而变化. 为了充分反映 RTD 结构中的 $I-V$ 关系, 采用半导体特性分析仪 (Agilent 4156C) 测试其 $I-V$ 特性. 同时, 为了反映其 $I-V$ 特性曲线的漂移量与外加作用力之间的对应关系, 需要精确测量作用在结构上的应力值, 采用喇曼散射光谱仪 (RENISHAW inVia) 的光纤测试系统标定应力值. 利用 RENISHAW 喇曼光谱仪进行微区应力测试时, 其测试误差较小, 不影响实验结果.

图 3 是搭建的实验测试系统原理框图. 实验中, 采用探针台固定测试样品, 利用探针及台面高度控制按钮给样品结构施加不同压力, 在每一次加力后, 采用半导体特性分析仪测量 RTD 结构的 $I-V$ 特性, 随后使用喇曼散射光谱仪标定外加的应力值. 整个测试过程在显微镜的实时监控下进行.

4 实验测试与结果分析

4.1 实验测试

为了定量分析 RTD 结构的压阻特性, 对 RTD 结构 (RTD1) 施加一组递增的作用力, 作用力的大

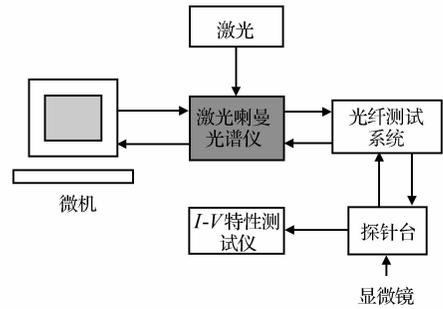


图 3 实验测试系统的原理框图

Fig. 3 Schematic diagram of the testing system

小用喇曼散射光谱仪的光纤测试系统标定. 实验中, 探针针尖扎在 RTD 的电极上, 而喇曼的检测位置选择在 RTD 突台附近的 GaAs 衬底上, 如图 4 所示.

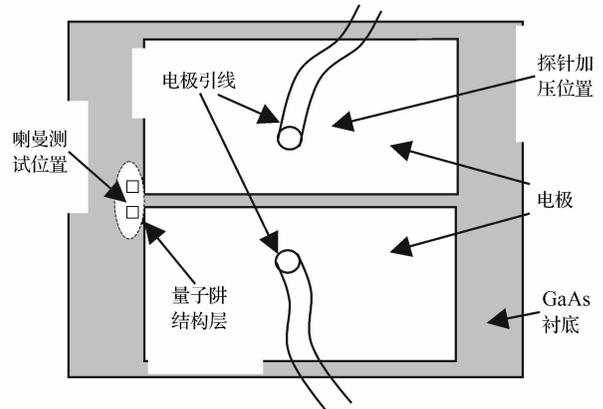


图 4 RTD 结构实验示意图

Fig. 4 Schematic diagram of RTD structure in experiment

在力的标定过程中, 首先测得外加压力为零时该 RTD 结构的表面残余应力 σ_r 为 1277.366 MPa (残余应力是结构的内应力, 它由工艺等条件引起, 与外加作用力无关); 随后利用探针台面高度控制按钮抬高结构, 使探针对结构施加逐次增大的作用力, 同时用喇曼光谱仪测量结构在每次加压下的表面应力 σ . 每次外加作用力 P 的值为

$$P = \sigma - \sigma_r \quad (1)$$

对于 GaAs 的 (100) 晶面, 表面应力 σ 与喇曼频移之间的关系为

$$\sigma = -576\Delta\omega \quad (2)$$

其中 $\Delta\omega$ 是喇曼频移, 单位是 cm^{-1} . 表面应力的标定结果如图 5 所示. 根据 (1) 式和图 5, 可得到四次外加的压力值分别为 0, 13.824, 25.344 和 31.104 MPa.

为了反映 RTD 结构在不同应力状态下的 $I-V$ 特性, 将半导体特性分析仪的两个接线端分别与

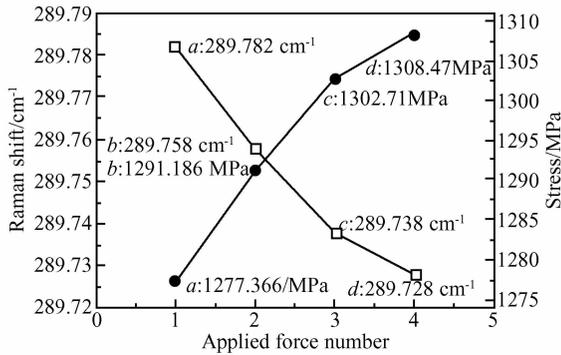


图 5 喇曼标定外加作用力的结果

Fig.5 Raman shifts and the different stresses

RTD 结构中发射极、集电极的引线相连,并设定分析仪的电压测试范围,在每次外加压力变化时,测量量子阱结构层的 $I-V$ 特性曲线.量子阱结构层在 RTD 结构中的位置如图 4 所示.

为了排除激光对该结构 $I-V$ 特性的影响,在每次应力标定之前,先用半导体特性分析仪测量 RTD 结构的 $I-V$ 特性,每次应力标定之后等待一段时间再测量其 $I-V$ 特性曲线,确保前一次的应力测试不对后一次的 $I-V$ 特性测量造成影响.得到了四次外加压力对应的 $I-V$ 特性曲线分别为 a, b, c 和 d ,它们之间的相对位置偏移关系如图 6 所示.

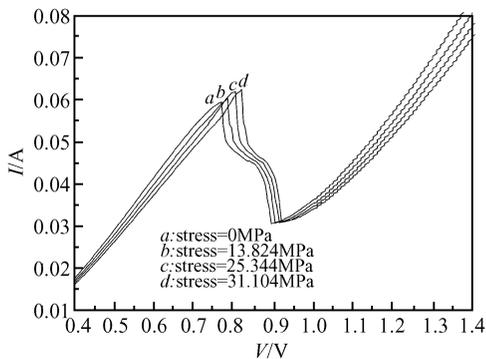


图 6 不同压力作用下的 $I-V$ 特性曲线

Fig.6 $I-V$ characteristics of RTD at different pressure states

为了精确地定量表达 RTD 结构的压阻特性,需要分析 RTD 结构因自身的不稳定所造成的 $I-V$ 特性曲线的漂移量.本文分析了 RTD 结构在相同测试条件下的 $I-V$ 特性一致性.在常温(严格控制在 300K)、真空条件下,对同一个 RTD 结构(RTD2)先后五次测量其正反 $I-V$ 特性,偏压从 -2 到 2V 均匀取 400 个点.如图 7 所示,在同一个图中采用五种线形分别表示这五条特性曲线,为了便于观察和分析,取 0.7~1.5V 偏压范围内的曲线.

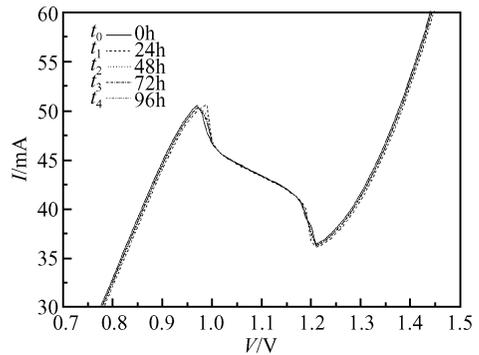


图 7 不同时间测得的 $I-V$ 特性曲线

Fig.7 $I-V$ characteristics of RTD at different times

4.2 灵敏度分析

假设外加作用力为 0MPa 时,得到的电阻值为 R_0 ,其余压力条件下的电阻值分别对应于 $R_i (i = 1, \dots, 3)$,则,灵敏度

$$s = \frac{R_i - R_0}{R_0 P} \quad (3)$$

其中 P 为四次外加压力的值.

根据(3)式,得到了不同作用力条件下灵敏度与其对应偏压之间的关系,如图 8 所示.由图可知,在不同加压条件下,灵敏度最大值对应的偏压值都是 0.895V(谷值位置),也即在谷值位置该 RTD 结构的压阻特性最为明显.由量子理论可知,在不同偏压作用下,共振隧穿薄膜势阱内第一量子阱化能级 E_c 发生漂移,当 $E_c = E_c$ 时(E_c 为发射极导带底能级),隧穿电流达到最大值,即为峰值.当 E_c 达到最小值时,通过双势垒的隧穿电流也最小,即为谷值.势阱内 E_c 的漂移使极值(峰值或谷值)位置的电流发生最大的变化,致使电阻的变化也最大.由灵敏度公式可知,最大的介观压阻灵敏度必然出现在电流的峰值或谷值位置,且不随压力值的变化而变化.因为不同测试结构其内部参数或工艺有所差别,从而使灵敏度最大点在峰值位置或谷值位置.本文研究的 RTD 结构其设计参数及加工工艺决定了它最大灵敏度的出现位置——谷值位置.

同时,从图 8 还可得到该 RTD 结构的压阻特性灵敏度大于 $1 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$. 经与硅压阻特性灵敏度的比较可知,该 RTD 结构的压阻特性最大灵敏度比硅的最大压阻灵敏度高一个数量级(硅的最大灵敏度为 $1.381 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ [11,12]).

4.3 一致性分析

从图 7 可以看出,相同温度、压力条件下,在不同时间测试同一个 RTD 结构得到的 $I-V$ 特性,其电阻的最大相对漂移量 $\left| \frac{R_i - R_0}{R_0} \right| (i = 0, 1, \dots, 4)$

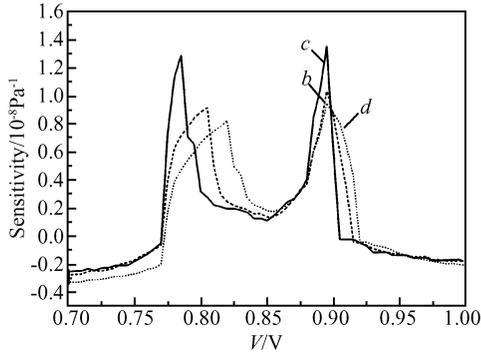


图 8 灵敏度最大值与偏压位置的关系

Fig.8 Relation between voltage and sensitivity of an RTD

小于 3%. 式中, R_i 为各次测得的电阻值, R_0 为所测电阻的平均值. 图 9 为不同时间电阻的相对漂移量与偏置电压之间的关系.

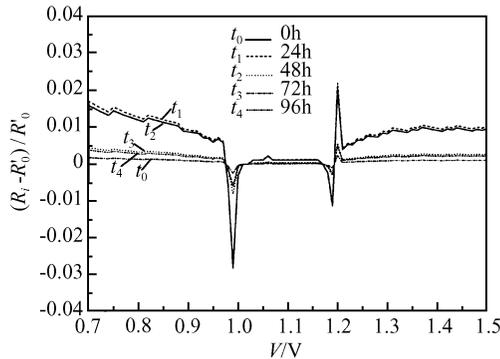


图 9 不同时间电阻的相对漂移量与电压的关系

Fig.9 Relation between voltage and relative resistance shift

在严格控制测试环境的温度、压强条件后,造成这种漂移的原因主要在于测试仪器的测量误差和工艺条件等引起的样品结构本身的不稳定性. 在相同的测试系统中,用半导体特性分析仪测量某一 15Ω (阻值与 RTD 的阻值相近,用高精度万用表测得电阻的平均值为 $14.93568 \pm 0.000002\Omega$) 的金属膜电阻,分析其电阻的最大相对漂移量约为 1%. 可以认为 RTD 结构电阻的相对漂移量中有 1% 的漂移量是由测试仪器造成的.

此外,分析图 6 可知,RTD 结构在四次外力的作用下,电阻的最大相对漂移量随着作用力的增大而增大,其值分别是 14.3%、25.9% 和 29.2%. 通过比较可知,RTD 结构因自身的不稳定性造成的压阻特性测试误差不是很大.

5 结论

设计了 AlAs/GaAs/InGaAs 量子阱结构,采用分子束外延技术生长了该材料薄膜,再采用腐蚀工艺和空气桥工艺加工得到 RTD 结构. 利用半导体特性分析仪、喇曼散射光谱仪和探针台搭建了 RTD 结构的压阻特性测试系统,测量了 RTD 结构在相同环境条件以及不同加压条件下的 $I-V$ 特性曲线,得到该结构在相同环境条件下电阻的最大漂移量小于 3%,其中测试仪器造成的偏移量占 1%. 此外,测试结果表明,该 RTD 的压阻灵敏度大于 $1 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$.

参考文献

- [1] Chang L L, Esaki L, Tsu R. Resonant tunneling in semiconductor double barriers. *Appl Phys Lett*, 1974, 24: 593
- [2] Yu R Y, Konishi Y, Allen S T, et al. A traveling-wave resonant tunnel diode pulse generator. *IEEE Microw Guided Wave Lett*, 1994, 4: 220
- [3] Brown E R, Söderström J R, Parker C D, et al. Oscillation up to 712GHz in InAs/AlSb resonant-tunneling diodes. *Appl Phys Lett*, 1991, 58(20): 2291
- [4] Chen C L, Mathews R H, Mahoney L J, et al. Resonant-tunneling-diode relaxation oscillator. *Solid-State Electron*, 2000, 44: 1853
- [5] Guo T H, Lin H C, Potter R C, et al. A novel A/D converter using resonant tunneling diodes. *IEEE J Solid State Circuits*, 1991, 26(2): 145
- [6] Xue Chenyang, Zhang Wendong, Xiong Jijun, et al. New type piezoresistors base on undoped double-barrier resonant tunneling microstructure. *IWMF*, 2004, 1: 498
- [7] Pithchard R, Klipstein P C, Couch N R, et al. High pressure studies of resonant tunneling in a graded parameter superlattice and in double barrier structures of GaAs/AlAs. *Semicond Sci Technol*, 1989, 4(9): 754
- [8] Klipstein P C. New resonant tunneling processes between longitudinal and transverse x-states in GaAs/AlAs double barrier structures beyond the type II transition. *J Phys Chem Solids*, 1995, 56(3/4): 435
- [9] Fobelets K, Vouckxt R, Borghs G. A GaAs pressure sensor based on resonant tunnelling diodes. *J Micromech Microeng*, 1994, 4: 123
- [10] Wen Tingdun, Zhang Wendong. Meso-piezoresistance effect. *Micronanoelectronic Technology*, 2003, 7/8: 41
- [11] Hsu T R. *MEMS & microsystems: Design and manufacture*. McGraw-Hill Science, 2002: 255
- [12] Li Kejie. *New handbook of sensor technique*. Beijing: National Defence Industry Press, 2002 (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]

Piezoresistive Properties of Resonant Tunneling Diodes*

Mao Haiyang[†], Xiong Jijun, Zhang Wendong, Xue Chenyang, Sang Shengbo, and Bao Aida

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

Abstract: This paper reports the piezoresistive properties of resonant tunneling diodes (RTDs) as detected with a newly established testing system. The shifts of their I - V characteristics in different stress states are detected, demonstrating that the RTDs possess piezoresistive properties. The sensitivity of the RTDs is larger than $1 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$. Moreover, to accurately illustrate the piezoresistive properties of RTD, the I - V characteristic coherence of an RTD is tested. According to the experimental results, the largest relative resistance shift of an RTD in the same environmental condition is less than 3%, 1% of which is caused by the testing instrument.

Key words: resonant tunneling diode; piezoresistive property; coherence; sensitivity; Raman spectrum

EEACC: 2560

Article ID: 0253-4177(2006)10-1789-05

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 50405025, 50375050) and the Fork Ying Tung Education Foundation (No. 01052)

[†] Corresponding author. Email: maohaiyang1982@126.com

Received 20 March 2006, revised manuscript received 24 April 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics