

双势垒量子阱薄膜力电耦合特性实验*

谢 斌[†] 薛晨阳 张文栋 熊继军 张斌珍

(中北大学电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051)

摘要: 用分子束外延方法在(001)GaAs衬底上生长了 AlAs/InGaAs 双势垒量子阱薄膜结构. 介绍了量子阱薄膜在(110)与(1 $\bar{1}$ 0)方向单轴压应力作用下的力电耦合实验, 测试出量子阱薄膜在室温下随着外加压力变化的 $I-V$ 曲线. 测试结果表明: 量子阱薄膜 $I-V$ 曲线的共振峰在(110)方向单轴应力作用下向正偏压方向漂移, 在(1 $\bar{1}$ 0)方向应力作用下向负偏压方向偏移, 并分析了量子阱薄膜力电耦合效应的物理成因. 该结果与基于量子阱力电耦合特性的介观压阻理论的研究结果相吻合.

关键词: 纳机电器件; 力电耦合; 单轴压力; 双势垒量子阱

PACC: 0300; 0630N

中图分类号: O484.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)08-1211-05

1 前言

随着材料研究的深入, 一些纳米材料展现出全新的物理性能、物理效应. 新一代基于这些新原理、新效应的纳机电器件呼之欲出. 当器件的特征尺寸达到纳米量级, 各种因为尺度变小而产生的效应(包括量子效应)就会凸现出来, 在机电结构中的力电耦合特性更加显著, 纳米尺度的力学问题也会体现出新的特征和新的性能^[1].

超晶格量子阱的概念是在 1970 年提出后, 随着分子束外延(MBE)和金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术及各种刻蚀技术的突破性进展, 至今人们已经能够制造出各种各样的超晶格量子阱材料. 由于超晶格量子阱材料可实现量子尺度效应, 并且能够通过改变合金的比例、阱、垒宽度, 控制半导体的能带和物理特性, 因此它具有广泛的应用前景.

近来, 介观压阻理论研究发现: 在满足一定的条件下, 力场的作用同样可以影响量子阱共振隧穿效应, 使隧穿电流发生变化, 此研究结果可用于力学信号的检测^[2~4]. 如果将超晶格薄膜集成于纳机电结构中便可构成新型纳机电系统. 笔者通过具体实验验证了该理论的研究结果.

本文采用 MBE 技术在 GaAs 衬底外延生长了 AlAs/InGaAs 超晶格量子阱, 用半导体化合物工艺加工出超晶格量子阱的上下电极, 然后将制备好的超晶格薄膜放在特制的夹具上并施加(110)和(1 $\bar{1}$ 0)

方向的单轴压力, 使量子阱薄膜内产生相应的应力, 并用激光喇曼测试仪标定了材料的应力值, 同时用半导体特性测试仪测试出不同应力值所对应的 $I-V$ 曲线, 从而分析力学信号对量子阱薄膜电学信号的影响, 即力电耦合特性分析.

2 基本理论

2.1 量子阱薄膜微分负阻特性

微分负阻是一种反常的 $I-V$ 特性, 即在一段区域内电流随着电压的增大反而减小, 一般称该区域为微分负阻区. 量子阱是具有微分负阻特性的一种纳米薄膜结构, 其基本结构为作为势垒层的宽带隙材料中夹着纳米级势阱层窄带隙材料. 从能带图上看, 导带上形成了双垒一阱的结构, 如图 1 所示.

其中, 结构的两端分别为发射极与集电极, 宽带隙材料层为势垒层, 势垒之间夹着的窄带隙材料层为势阱层, E_0 为势阱的第一量子化能级, E_f 为发射极的费米能级, E_c 为发射极导带底能级. 在图 1 中通过能带分析了量子阱薄膜的微分负阻特性形成的物理成因:

(1) 当没有偏压时, $E_0 \geq E_f$, 不满足量子阱中电子发生共振的条件, 因此没有隧穿电流.

(2) 当给双势垒薄膜施加一定偏压后, $E_c < E_0 < E_f$, 此时双势垒量子阱中的电子发生共振隧穿; 随着偏压的增大, E_c 不断减小, 透射几率不断增大, 因而电流不断增大.

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 50375050)

[†] 通信作者, Email: macroxb@163.com

2006-09-14 收到, 2007-04-12 定稿

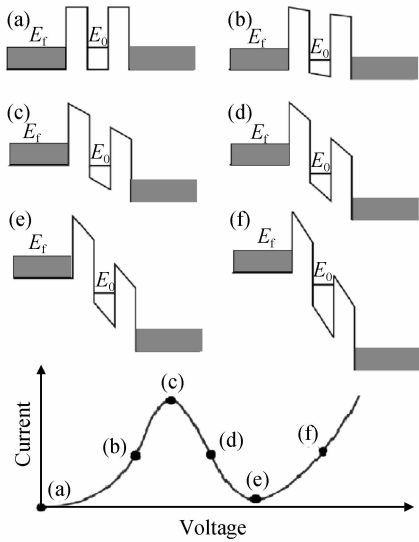


图 1 微分负阻能带分析图

Fig. 1 Schematic for analyzing negative differential resistance based on band

(3) 当 $E_o = E_c$, 电流达到峰值, 在 $I-V$ 特性曲线上定义为共振峰, 该点对应的电压值称为峰值电压。

(4) 随电压进一步增大, $E_o < E_c$, 双势垒薄膜透射几率开始减小, 所以电流随电压增大而减小, 出现负阻效应。

(5) 当 E_o 达到最小值时, 通过双势垒的电流就达到最小值, 该点对应的电压值称为谷值电压。

(6) 当电压继续增大时, 通过量子阱的热电流增大, 因此电流又随着电压增大而增大。

2.2 喇曼测试应力原理

喇曼光谱可精确测量材料在晶格振动时所具有的能量. 当材料受到压力时, 其晶格结构就会产生变化, 晶格振动能量大小也将发生改变, 其喇曼频移亦将发生改变(变化量为 $\Delta\bar{\omega}$, 即相对喇曼频移), 根据应力 σ 与相对喇曼频移 $\Delta\bar{\omega}$ 之间的关系就可以精确计算出晶体内部所产生的应力^[4].

当晶体产生应力时, 其散射的喇曼光谱相对于其本征喇曼频谱会发生频移. 对不同晶面(110), (111), (100), 其相对频移和应力之间的关系可以表述成下式^[3]

$$\Delta\bar{\omega} = \frac{\lambda_1}{2\bar{\omega}_0} = \frac{p(S_{11} + S_{12}) + q(S_{11} + 3S_{12}) + rS_{44}}{4\bar{\omega}_0} \sigma_{xx} \quad (1)$$

$$\Delta\bar{\omega} = \frac{\lambda_2}{2\bar{\omega}_0} = \frac{p(S_{11} + S_{12}) + q(S_{11} + 3S_{12}) - rS_{44}}{2\bar{\omega}_0} \sigma_{xx} \quad (2)$$

$$\Delta\bar{\omega} = \frac{\lambda_3}{2\bar{\omega}_0} = \frac{q(S_{11} + S_{12}) + pS_{12}}{2\bar{\omega}_0} \sigma_{xx} \quad (3)$$

式中 $\Delta\bar{\omega}$ 为相对喇曼频移; S_{11}, S_{12}, S_{44} 为晶体柔性

张量; p, q, r 为声子形变潜能; σ_{xx} 为应力.

对于 GaAs 晶体而言, 本征喇曼频移 $\bar{\omega}_0 = 267\text{cm}^{-1}$, 将其他参数带入可以得到(100)晶面应力和相对喇曼频移之间的关系方程:

$$\sigma_{xx} = -527\Delta\bar{\omega}(\text{MPa}) \quad (4)$$

3 量子阱薄膜的制备

3.1 薄膜生长

首先, 采用 MBE 技术在 GaAs 衬底上生长出 AlAs/InGaAs 双势垒量子阱薄膜结构, 其核心部分为双势垒单势阱系统, 即 AlAs/In_{0.1}Ga_{0.9}As/AlAs. 势垒选择禁带宽度大的 AlAs 材料, 垒宽为 2~5 个原子层厚度, 双势垒之间夹着不掺杂的 In_{0.1}Ga_{0.9}As 势阱层. 其次, 在双势垒两端分别生长一层掺杂浓度为 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 的发射极层和集电极层, 为量子阱的隧穿效应提供隧穿电子. 为了防止掺杂在发射层和集电层里的杂质向势垒和势阱区扩散, 特在双势垒区两端各生长一层 GaAs 隔离层, 同时在隔离层中各增加一层 In_{0.1}Ga_{0.9}As, 使得发射区、集电区和势垒之间形成一个垒前阱, 如表 1 所示.

3.2 薄膜加工

为了测试超晶格薄膜的 $I-V$ 特性, 将超晶格划分为一定面积的单元, 并通过半导体工艺在每个单元的发射极与集电极两端加工金属电极, 具体过程如下:

用电感耦合高密度等离子刻蚀机将生长好的超晶格薄膜圆片刻蚀出若干个尺寸为 $5000\mu\text{m} \times 5000\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$ 的样品块, 每个样品上表面中心部位加工出一块 $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m} \times 1.5\mu\text{m}$ 的正方形超

表 1 量子阱薄膜层结构

Table 1 Layer structure of quantum well membrane		
n ⁺ -GaAs	$3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	500nm
n ⁺ -GaAs	$2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$	10nm
GaAs	Undoped	5nm
In _{0.1} Ga _{0.9} As	Undoped	5nm
GaAs	Undoped	0.5nm
AlAs	Undoped	1.7nm
GaAs	Undoped	0.5nm
In _{0.1} Ga _{0.9} As	Undoped	4nm
GaAs	Undoped	0.5nm
AlAs	Undoped	1.7nm
GaAs	Undoped	0.5nm
In _{0.1} Ga _{0.9} As	Undoped	5nm
GaAs	Undoped	5nm
n ⁺ -GaAs	$2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$	10nm
n ⁺ -GaAs	$3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	1000nm
SI-GaAs substrate		

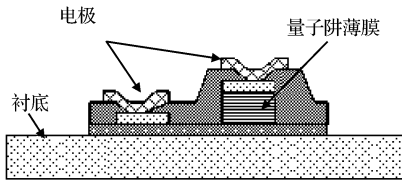


图 2 薄膜单元结构图

Fig. 2 Cross section image of the membrane cell

晶格薄膜单元;在每个薄膜单元的发射极与集电极上生长一层 AuGeNi 欧姆接触层;再电镀一层 Au 电极.薄膜单元结构如图 2 所示.

4 实验测试及分析

4.1 实验测试

选用一种可微调压力值且带螺旋测微头装置的夹具,其测微头一端纵向固定在支架上,另一端连着可活动的压块.将制备好的样品夹在固定支架和活动块之间,通过该装置活动压块向薄膜施加压力^[5];用两块固定在支架上且与支架绝缘的电极压焊块分别引出超晶格的上电极和衬底电极,再接到 Agilent 4156C 半导体特性测试仪上,这样就可以利用压焊块将超晶格两电极和半导体特性测试仪连接起来,以便进行 $I-V$ 特性测试.

此外,将整个测试装置放置于喇曼测试仪的激光探头下方,通过喇曼测试仪测出超晶格在相应压力作用下所产生的应力值^[6].本实验所采用的是 RENISHAW inVia 激光喇曼光谱仪,分辨率为 0.02cm^{-1} ,代入(4)式,便可求得应力测量误差为 10MPa,Agilent 4156C 半导体特性测试仪测量电压精度为 1mV.测试原理如图 3 所示.

首先,在外加压力为零的情况下测量薄膜的残余应力(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);然后通过旋转螺旋测微头,沿(110)和(1 $\bar{1}$ 0)晶向给量子阱薄膜施加一组递

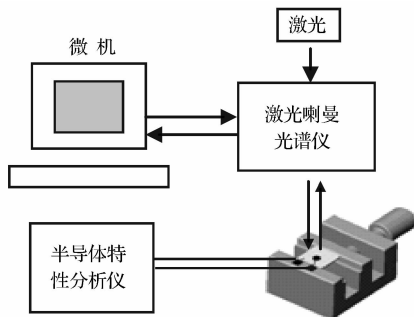


图 3 力电耦合特性测试系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the stress experiment

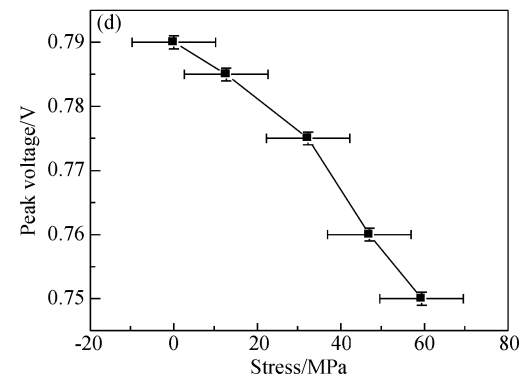
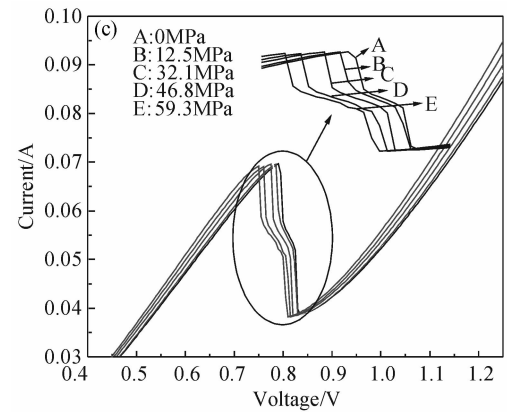
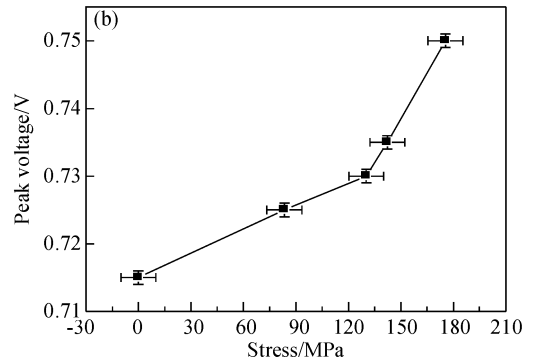
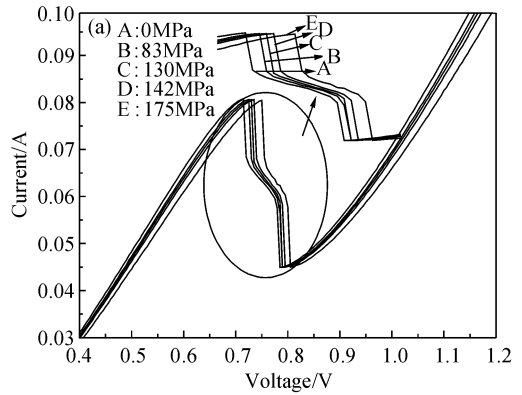


图 4 不同晶向压力作用的 $I-V$ 特性曲线以及峰值电压漂移曲线

Fig. 4 Shift of $I-V$ characteristic and peak voltage under stress

增的作用力,同时用喇曼光谱仪测量结构在每次加压下的表面应力,将该表面应力减去残余应力,便得到外加压力所产生的应力值.为了便于分析,我们将首次作用力的大小归零,其余各次作用力的大小是相对于首次作用力的增量.在每次标定应力的同时,利用半导体特性分析仪测量量子阱薄膜结构的 $I-V$ 特性,得到的 $I-V$ 特性分别为 A,B,C,D,E,它们之间的相对位置偏移关系如图 4 所示.其中 (a) 为 (110) 方向加压的 $I-V$ 特性漂移曲线;(b) 为 (110) 方向加压薄膜峰值电压随应力变化关系曲线;(c) 为 (1 $\bar{1}0$) 方向加压的 $I-V$ 特性漂移曲线;(d) 为 (1 $\bar{1}0$) 方向加压薄膜峰值电压随应力变化关系曲线.

4.2 结果分析

图 4 中,在 (110) 方向施压时,随着外加压力值的增大,超晶格量子阱的 $I-V$ 曲线共振峰值逐渐向正偏压方向平移,峰值电压随着应力的增大不断增加;在 (1 $\bar{1}0$) 方向施压时共振峰值逐渐向负偏压方向平移,峰值电压随着应力的增大不断减小.

产生这种现象的主要原因在于:Ⅲ-V 族半导体材料都具有压电特性^[7].当薄膜样品被施加侧向压力后,必然在薄膜生长方向产生剪应力,使得超晶格薄膜各层材料界面处将积累极化电荷,从而产生内建电场.(110) 晶向施压后的极化电荷分布如图 5 (a) 所示,(1 $\bar{1}0$) 晶向施压后的极化电荷分布如图 5 (b) 所示.

由于 AlAs 的压电系数比 GaAs 的压电系数大^[8],

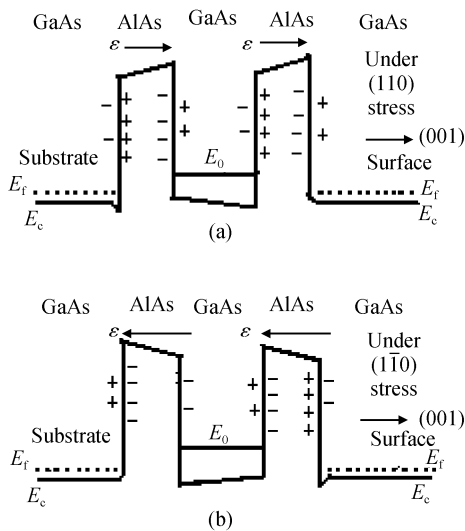


图 5 应力引起极化电荷分布图 (a) (110) 晶向应力引起极化电荷分布图;(b) (1 $\bar{1}0$) 晶向应力引起极化电荷分布图.
Fig. 5 Schematic band diagram and polarized charge distribution (a) Distribution under (110) stress; (b) Distribution under (1 $\bar{1}0$) stress

(110) 方向施压时,内建电场的方向 ϵ 与外加正偏电压产生电场 E_a 的方向相反,因此需要增加外加偏压来补偿由内建电场产生电势差;(1 $\bar{1}0$) 方向施压时,内建电场 ϵ 的方向与外加正偏电压产生电场 E_a 的方向相同,因此需要减小外加偏压来补偿由内建电场产生电势差,如图 6 所示.

此外,应力也会引起量子阱薄膜能带的变化,但能带的变化可以归结为是由量子阱内部电场的变化引起的.如图 6 所示,(110) 方向施压时,内建电场的方向 ϵ 与外加正偏电压产生电场 E_a 的方向相反,能带会向上漂移,量子阱内的量子能级也随之向上漂移,隧穿电流减小,在 $I-V$ 曲线上也表现为共振峰值逐渐向正偏压方向平移;在 (1 $\bar{1}0$) 方向施压时,量子能级向下漂移,隧穿电流增大,在 $I-V$ 曲线上也表现为共振峰值逐渐向负偏压方向平移.

5 结论

运用自行搭建的量子阱薄膜结构力电耦合特性测试系统,测试了量子阱薄膜结构在 (110) 和 (1 $\bar{1}0$) 晶向压力下的 $I-V$ 特性曲线并研究其变化情况.实验数据表明:量子阱薄膜 $I-V$ 特性的共振峰值在 (110) 方向单轴应力作用下向正偏压方向漂移,在 (1 $\bar{1}0$) 方向应力作用下向负偏压方向偏移,且定性的分析了产生该现象的物理成因.

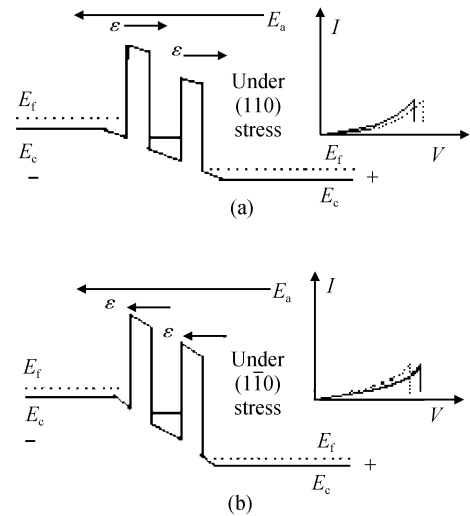


图 6 外加偏压和压力后的能带图与 $I-V$ 曲线漂移示意图 (a) (110) 方向施压;(b) (1 $\bar{1}0$) 方向施压 $I-V$ 曲线中的实线为未加压力时的 $I-V$ 曲线,虚线为加压后的 $I-V$ 曲线.
Fig. 6 Schematic band diagram and $I-V$ curves (a) Under (110) pressure; (b) Under (1 $\bar{1}0$) pressure The solid line $I-V$ curve represents the current without stress and the dotted line represents the current with pressure.

本文突破传统力电耦合特性的宏观物理局限,具体地研究了量子阱材料的力电耦合特性.通过实验验证了基于量子阱材料的力电耦合介观理论的研究成果,即力场的作用可以影响量子阱的共振隧穿效应,并且进一步定量描述了在(110)和(1 $\bar{1}0$)方向压力作用下的 I - V 特性变化情况,该实验结果可为量子阱材料在纳机电器件中的应用提供实验依据.

参考文献

- [1] Zhu Jing. Nanophase materials and devices. Beijing: Tsinghua University Press, 2003; 378 (in Chinese) [朱静. 纳米材料和器件. 北京: 清华大学出版社, 2003; 378]
- [2] Wen T D, Anastassakis E, Xu L P. Multilayer systems driven by elastic standing waves. *Phys Status Solidi A*, 1996, 154: 635
- [3] Wen T D, Xu L P, Anastassakis E. On the piezoelectric signals of multilayer systems. *Phys Status Solidi A*, 2000, 177: 467
- [4] Wen Tindun, Xu Liping, Xiong Jijun. The meso-piezo-resistive effects in MEMS/NEMS. *Solid State Phenomena*, 2007, 121~123: 619
- [5] Mutamba K. A comparative study of uniaxial pressure effects in intraband AlGaAs/GaAs and interband InAs/AlSb/GaSb resonant tunneling diodes. *Appl Phys Lett*, 1998, 72: 1629
- [6] De Wolf I. Raman spectroscopy: about chips and stress. *Spectroscopy Europe*, 2003, 75: 6
- [7] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R, et al. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. *Appl Phys Rev*, 2001, 89: 5815
- [8] Adachi S. GaAs, AlAs, and $Al_xGa_{1-x}As$; material parameters for use in research and device application. *J Appl Phys*, 1985, 58: R18

Mechanical-Electrical Coupling of Double-Barrier Quantum Well Membrane*

Xie Bin[†], Xue Chenyang, Zhang Wendong, Xiong Jijun, and Zhang Binzhen

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: An AlAs/GaAs superlattice quantum well membrane is grown by MBE on (001)-oriented GaAs substrates. A mechanical-electrical coupling experiment on this membrane under (110) and (1 $\bar{1}0$) uniaxial pressure is conducted, and the pressure-dependent current-voltage characteristics are tested. Under (110) stress, the resonance peaks shift to more positive voltages, while under (1 $\bar{1}0$) stress, the peaks shift toward more negative voltages. The mechanism that induces this phenomenon is discussed. The result agrees well with that of the Meso-piezoresistive theory.

Key words: nano electro-mechanical system; mechanical-electrical coupling; uniaxial pressure; double-barrier quantum well

PACC: 0300; 0630N

Article ID: 0253-4177(2007)08-1211-05

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50375050)

[†] Corresponding author. Email: macroxb@163.com

Received 14 September 2006, revised manuscript received 12 April 2007