

轴向应变对双势垒结构共振隧穿的影响

张庆伟, 温廷敦

(中北大学 微米纳米技术研究中心, 山西 太原 030051)

摘 要: 首先介绍了共振隧穿理论和一种新效应——介观压阻效应, 对 $Al_xGa_{1-x}As/GaAl/Al_xGa_{1-x}As$ 共振隧穿双势垒结构的轴向施加压应变作了分析, 然后计算了轴向应变对垒宽和垒高的影响, 对透射系数和隧穿电流用 Matlab 作了仿真. 发现压应变可以使隧穿电流线性增加, 偏压不同电流增加的速率也不同, 为设计共振隧穿器件提供了理论依据.

关键词: 应变; 共振隧穿; 介观压阻效应

中图分类号: O471

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)05-0199-03

The Influence of Axial Strain on Double-Barrier Resonant Tunneling

ZHANG Qing-wei, WEN Ting-dun

(The Center of Micro/Nano Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: This paper firstly introduced a new effect, meso-piezoresistive effect, analysed the strain on $Al_xGa_{1-x}As/GaAl/Al_xGa_{1-x}As$ double-barrier resonant tunneling structure along the axis director; then computed the influence of the barrier width and height from the axial strain, used Matlab as tool simulate the transmission coefficient and tunneling electric current. Finally we find the strain can make the electric current increase linearly, the velocity of increase differ with different voltage. It offers a theory basis for devising resonant tunneling devices.

Key words: strain; resonant tunneling; meso-piezoresistive effect

1 引言

隧穿效应是一种十分重要的量子力学效应. 当入射电子的能量与阱中量子能级相等时, 透射系数等于 1, 这就是共振隧穿. 它是在宏观上可以直接观察到的量子效应, 半导体技术的发展使得制备这样尺度的宏观结构成为可能. 超晶格量子阱材料可实现量子尺度效应, 能够通过改变化合物的比例、参数、阱、垒宽度, 实现控制半导体的能带和物理特性, 设计量子效应器件. 并且, 近年来量子效应器件^[1]的优点已经表现出来, 它反应灵敏、功能强大. 可以用相当少量的这些器件, 去执行具有相对复杂的电路功能, 因此可能取代大量的晶体管或是无源电

路部件^[2]. 文中在量子尺寸的共振隧穿结构上施加应变, 可以改变它的能带、参数和物理特性, 引起隧穿电流的变化, 体现了强烈的压阻效应. 可以为新型的压阻式量子电子器件提供理论基础, 因此有广阔的应用前景.

2 介观压阻效应及共振隧穿理论公式

介观压阻效应^[3,4]的定义为“等效电阻的应力调制”, 这里的等效电阻是对共振隧穿效应的一种具体描述. 在这里由四个物理过程组成: (1) 在力学信号下, 纳米结构中的应力分布将发生变化; (2) 一定条件下应力变化可以引起内建电场的产生; (3) 内建电场将导致纳米带结构中量子能级发生变化; (4) 量

子能级变化会引起共振隧穿电流变化. 简言之, 在共振隧穿附近, 通过上述过程, 可将一个微弱的力学信号转化为一个较强的电学信号, 体现出较大的压阻系数. 本文所做的单轴应力下应变对共振隧穿的影响是介观压阻效应的具体实现.

一束电子波从左边入射过来, 它将部分地被反射, 部分地被透射, 当入射电子的能量与阱中量子化能级相等时, 透射系数 $T = 1$, 这就是共振隧穿. 透射系数的公式为:

$$T = \frac{k_n m_1^* |A_n|^2}{k_1 m_n^* |A_1|^2} = \frac{k_n m_1^*}{k_1 m_n^*} |M_{11}|^{-2} \quad (1)$$

上式是入射电子能量和外加偏压的函数. 通过整个结构的隧穿电流密度可以表示为:

$$J = \frac{em^* k_B T}{2\pi^2 \hbar^3} \int_0^\infty T(E_\perp) \times \ln \left\{ \frac{1 + \exp[(E_F - E_\perp)/k_B T]}{1 + \exp[(E_F - E_\perp - eV_a)/k_B T]} \right\} dE_\perp \quad (2)$$

式中, e 为电子电荷的大小, m^* 为有效质量, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, E_F 为费米能级, $E_\perp$ 为入射电子沿薄膜生长方向的能量.

3 物理参数随应变的变化

文中采用的模型如图(1)所示, 势垒和势阱的材料分别为 $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ 和 $GaAs$. V_0 , L_B 和 L_W 分别表示垒高、垒宽和阱宽. 1、R 和 T 分别表示入射波、发射波和透射波. 该结构在 z 轴方向施加压应变时, 会对材料的一些物理参数造成影响.

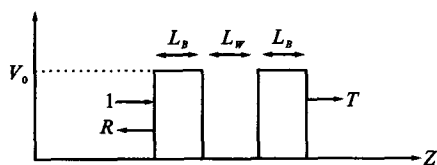


图1 $Al_{0.5}Ga_{0.5}As/GaAs/Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ 结构的势能剖面图

根据材料力学, 应变会引起阱宽和垒宽的变化, 压应变会使垒宽和阱宽变窄. 体积的变化为^[5]:

$$\frac{\Delta V}{V} = \epsilon_{xy} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = -\frac{P}{B} + 2(1 - \frac{C_{12}}{C_{11}})\epsilon_{xx} \quad (3)$$

对禁带宽度的影响^[6]:

$$E_g^a(V) = E_g^a(V_0) + a_v^a \frac{\Delta V}{V} \quad (4)$$

式中, P 为压力, B 为弹性模量, C_{11} 、 C_{12} 分别为应变层的弹性常数, $E_g^a(V_0)$ 为没有应变时材料的禁带宽度, a_v^a 为导带和价带之间的体积形变势.

势垒高度是影响共振隧穿的重要的参数. 势垒

高度是由禁带宽度来决定的, 三元混晶 $Al_xGa_{1-x}As$ 的禁带宽度与组分满足如下关系:

$$E_g(Al_xGa_{1-x}As) = (1-x)E_g^{GaAs} + xE_g^{AlAs} \quad (5)$$

对于多数 III-V 族半导体材料构成的异质结, 其导带带阶尚没有公认的数值, 一般采用 70:30 规则^[7], 即导带带阶占两种材料禁带宽度之差的 70%, 而价带带阶占两种材料禁带宽度的 30%. 这样

$$V_0 = 0.7(E_g(GaAlAs) - E_g(GaAs)) \quad (6)$$

把式(3)~(5)代入式(6), 并且代入表 1 中的参数, 通过计算得到 $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ 组成的量子阱结构的势垒高度与外加应变的关系为

$$V_0 \approx 0.5341 - 0.06\epsilon_{xx} \quad (7)$$

所以垒高随应变的增加而下降, 并且成线性关系. 文中使用的参数如表 1 所示.

表 1 参数表

	C_{11} (10^{11} dyn/cm ²)	C_{12} (10^{11} dyn/cm ²)	$E_g^a(V_0)$ (eV)	a_v^a (eV)	m_e^*/m_0	μ
AlAs	12.02	5.7	2.95	2.7	0.15	0.311
GaAs	11.88	5.38	1.424	2.7	0.067	0.325

4 计算结果

把以上应变对垒宽和垒高的影响, 代入式(1)、(2). 计算结果如图 2、图 3、图 4 所示.

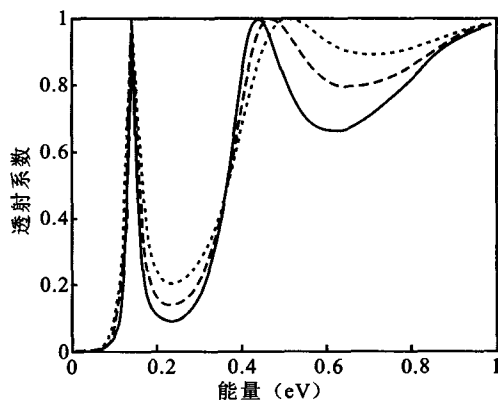


图 2 偏压为零时, 不同应变对透射系数的影响

图 2 为偏压为零时, 不同应变对透射系数的影响, 实线、虚线和点分别是应变为 0%、5%、10% 对应的透射系数. 随着应变的增加, 透射系数的第一个峰值和第二个峰值之间的距离会增大, 尖峰的宽度也会增加.

图 3 为不同应变时, 偏压对隧穿电流的影响, 实线、虚线和点分别是应变为 0%、5%、10% 对应的隧穿电流, 随着应变的增加, 隧穿电流明显增加.

图 4 为不同偏压时, 应变对隧穿电流的影响. 实

线、虚线和点分别是偏压为 0.8V、1.0V、1.2V 时对应的隧穿电流,可以看出偏压一定时,电流随着应变的增加而线性增加.但是增加的斜率不同,所以在实际应用中用外加应变控制隧穿电流时,要选择合适的偏压.

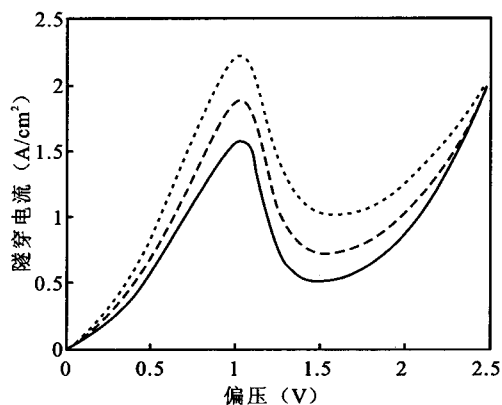


图3 不同应变时,偏压对隧穿电流的影响

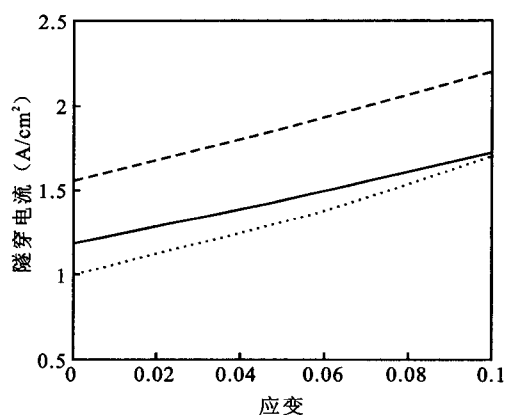


图4 不同偏压时,应变对隧穿电流的影响

5 结束语

通过分析计算,在 $Al_{0.5}Ga_{0.5}As/GaAs/Al_{0.5}$

$Ga_{0.5}As$ 的 z 方向施加压应变,会改变共振隧穿结构的垒宽和阱宽,会使透射系数的尖峰变宽、峰值间距增加,使隧穿电流增大.偏压一定时外加应变和隧穿电流呈线性增加关系,并且偏压不同时斜率也不同.通过调节外加应变可以实现对隧穿电流的控制.

参考文献:

- [1] 李树花,李斌,吴为敬.多晶硅薄膜晶体管泄漏区带间隧穿电流的建模[J].微电子学与计算机,2009,26(3):64-67.
- [2] 温银萍,温廷敦.介观压阻型硅锗加速度计研究[J].微电子学与计算机,2009,26(3):22-25.
- [3] 温廷敦,张文栋.介观压阻效应[J].微纳电子技术,2003(7/8):41-43.
- [4] Liping Xu, Tingdun Wen, Xiaofeng Yang, et al. Mesopiezoresistive effects in double-barrier resonant tunneling structures[J]. Applied Physics Letters, 2008(92): 043508.
- [5] Judah A Tuehman, Sangsig Kim, Zhifeng Sui, et al. Exciton photoluminescence in strained and unstrained ZnSe under hydrostatic pressure[J]. Phys Rev B, 1992(46): 13371-13378.
- [6] Wei S H, Zunger A. Predicted band-gap pressure coefficients of all diamond and zinc-blende semiconductors; [J]. chemical trends, Phys Rev B, 1999(60):5404.
- [7] Ban S L, Hasbun J E. Interface polarons in a realistic hetero junction potential[J]. Eur. Phys. 1999, 8(3): 453-461.

作者简介:

张庆伟 男,(1980-),硕士研究生.研究方向为纳机电控制器件的设计.

温廷敦 男,(1957-),教授,博士生导师.研究方向为介观物理与微纳器件.