

# 磁势垒结构中隧穿现象的研究\*

郭 永 顾秉林

(清华大学现代应用物理系 北京 100084)

**摘要** 本文用转移矩阵方法研究了具有纳米尺度的非对称磁势垒结构中电子的隧穿效应。结果表明和电子穿越对称双磁势垒结构相比，电子隧穿非对称双磁势垒结构的传输几率和电导都强烈减小，并且非对称磁势垒结构具有更强的波矢过滤特性。

PACC: 7340G

## 1 引言

人们已对电子在电势垒结构中的输运现象进行了广泛而深入地研究。近年来具有纳米尺度的磁势垒结构中电子的运动引起人们越来越浓厚的兴趣。电势垒结构可以通过异质结能带不连续(或能隙)来产生，而磁势垒结构则可通过在异质结上沉积磁点<sup>[1]</sup>、铁磁物质<sup>[2]</sup>或超导物质<sup>[3]</sup>来产生。最近 Matulis 等人<sup>[4]</sup>从理论上提出实验上可以实现的四种磁势垒结构，并且指出电子隧穿磁势垒结构实际上是一个二维过程，传输几率随入射电子能量的变化不仅与电子隧穿方向的波矢有关系，而且还与和隧穿相垂直的另外一个方向的波矢密切相关，磁势垒结构具有波矢过滤的特点。随后 You 等人<sup>[5]</sup>用平面波近似计算了 Matulis 等人提出的四种磁势垒结构中的其中两种结构的传输几率和电导。

本文利用转移矩阵方法系统研究非对称双磁势垒结构中电子的隧穿效应。在这类结构中电子的隧穿行为既有别于电子在非对称双电势垒结构中的隧穿，又明显不同于电子隧穿对称双磁势垒结构。和对称双磁势垒结构相比，非对称双磁势垒结构具有更强的波矢过滤特性。

## 2 理论模型

我们考虑电子入射如图 1 所示的非对称双磁势垒结构。为方便起见，所有的量我们都用回旋频率  $\omega_c = eB_0/m^*$  (对 GaAs,  $m^* = 0.067m_e$ , 其中  $e$  和  $m_e$  分别为自由电子的电荷和裸质量) 和磁长度  $l_B = (\hbar/eB_0)^{1/2}(B_0$

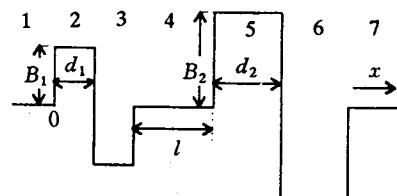


图 1 非对称双磁势垒结构

\* 本课题得到国家“863”的资助

郭 永 男, 1966 年生, 博士研究生, 从事介观系统输运现象的研究

顾秉林 男, 1945 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事固体电子结构的研究

1996 年 9 月 20 日收到初稿, 1996 年 10 月 30 日收到修改稿

$=0.1\text{ T}$ )来表示. 磁场沿 $z$ 方向, $x$ 的坐标原点取在于1区和2区的交界处. 在 $(x,y)$ 平面内的电子气的波函数可以写成 $\Psi(x,y)=e^{iqy}\Psi(x)$ , 其中 $q$ 为 $y$ 方向的波矢. 于是电子在各个区域的一维薛定谔方程可写为

$$\left\{\frac{d^2}{dx^2} - [A_i(x) + q]^2 + 2E\right\}\Psi(x) = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, 7) \quad (1)$$

式中  $A_i(x)$ 为各个区域的矢量势,  $V(x)=[A_i(x)+q]^2/2$  可解释为依赖于 $q$ 的有效电势垒. 解此方程可得到各个区域的波函数, 进而利用波函数及其导数在边界处的连续性求得电子的传输几率

$$T(E, q) = \frac{k_x^r}{k_x^l} |\tau|^2 \quad (2)$$

其中  $k_x^r$  和  $k_x^l$  分别为出射区和入射区电子沿 $x$ 方向的波矢;  $\tau$ 为电子的透射波幅.

在弹道区, 电导可由下式给出<sup>[4,6]</sup>

$$G = G_0 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} T(E_F, \sqrt{2E_F} \sin\varphi) d\varphi \quad (3)$$

式中  $\varphi$ 是相对于 $x$ 方向的入射角;  $E_F$ 为费米能;  $G_0 = e^2 m v_F l / h^2$  ( $l$ 为 $y$ 方向的结构线度,  $v_F$ 为费米速度).

### 3 数值计算结果和讨论

我们应用公式(2)和公式(3)计算了电子穿越如图1所示的非对称双磁势垒结构的传输几率和电导. 图2(a)和(b)分别表示电子入射由磁势垒高度和宽度的差异而决定的两类非对称双磁势垒结构的传输几率随入射电子能量的变化. 为了验证程序的正确性, 我们首先计算了Matulis等人采用的对称双磁势垒结构的传输几率, 计算结果和Matulis等人计算的结果完全吻合, 在这里为了避免重复就不再给出(参见文献[4]中的图4(a)). 图2(a)的结构参数为 $B_1=0.1\text{ T}$ ,  $B_2=0.2\text{ T}$ ,  $d_1=d_2=1$ ,  $l=3$ . 图2(b)的结构参数为 $B_1=B_2=0.1\text{ T}$ ,  $d_1=1$ ,  $d_2=2$ ,  $l=3$ .

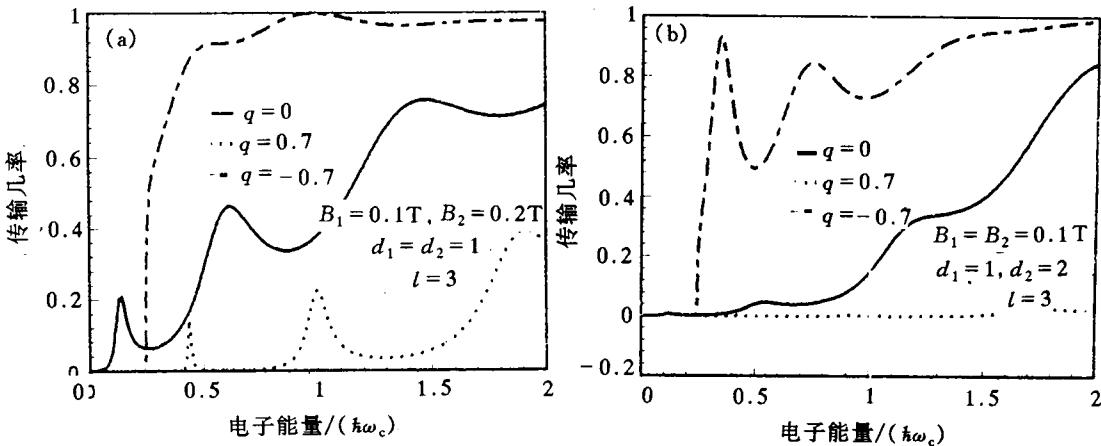


图2 电子入射非对称双磁势垒结构的传输几率随入射能量的变化

果完全吻合, 在这里为了避免重复就不再给出(参见文献[4]中的图4(a)). 图2(a)的结构参数为 $B_1=0.1\text{ T}$ ,  $B_2=0.2\text{ T}$ ,  $d_1=d_2=1$ ,  $l=3$ . 图2(b)的结构参数为 $B_1=B_2=0.1\text{ T}$ ,  $d_1=$

1,  $d_2=2, l=3$ . 图中实线、虚线和点划线分别代表入射电子波矢为  $q=0, 0.7, -0.7$  的情况. 从图中我们不难看出和电子入射对称双磁势垒结构相比(参见文献 4 中的图 4(a)), 对具有同一波矢  $q$  的电子入射由磁势垒宽度和高度决定的两类非对称磁势垒结构的传输几率均明显减小, 而且波矢不同, 传输几率减小的程度各异. 衰减的程度强烈地依赖于波矢  $q$  的大小和不同取向以及结构的不对称程度. 对具有同一大小但取向相反波矢的电子, 负方向波矢(即  $q<0$ )的电子入射非对称磁结构的传输几率衰减的程度远远小于具有正方向波矢(即  $q>0$ )时电子传输几率的变化. 并且结构越不对称, 衰减的程度也越大, 甚至导致振荡峰的完全消失. 这些现象可以从电子入射非对称双磁势垒结构具有不同的波矢时所对应的有效势的形状和对称性不同而得到解释. 非对称双磁势垒结构当  $q>0$  时对应的结构有效势是非对称双势垒结构, 而对称双磁势垒结构当  $q>0$  时对应的结构有效势是对称双势垒结构<sup>[4]</sup>. 我们知道, 电子在双势垒结构中的运动是基于量子力学的共振隧穿, 并且在非对称双势垒结构中电子的隧穿行为和在对称双势垒结构中的隧穿行为又有显著的差别, 其中之一是在零电磁场下, 电子在非对称双势垒结构中不能实现理想的共振隧穿(即传输几率的峰值不能达到 1), 只有施加适当的偏压才能得到理想的共振<sup>[7]</sup>. 非对称双磁势垒结构在  $q<0$  时对应的结构有效势是非对称的双量子阱结构, 而对称双磁势垒结构在  $q<0$  时对应的结构有效势是对称的双量子阱结构. 在量子阱结构中电子的运动是量子阱上的实态传输. 因此, 对具有不同波矢  $q$  的电子入射非对称双磁势垒结构, 必然会在传输几率上体现出既不同于隧穿双电势垒结构的特点, 又显著不同于隧穿对称双磁势垒结构的特点.

图 3(a)和(b)分别表示电子入射由磁势垒结构高度和宽度差异决定的两类非对称双磁势垒结构的电导随费米能的变化(结构参数如图中所示). 图中实线是电子隧穿对称双磁势垒结构的计算结果, 计算电导得到的结果和文献[4]中相同结构的计算结果完全吻合(参见

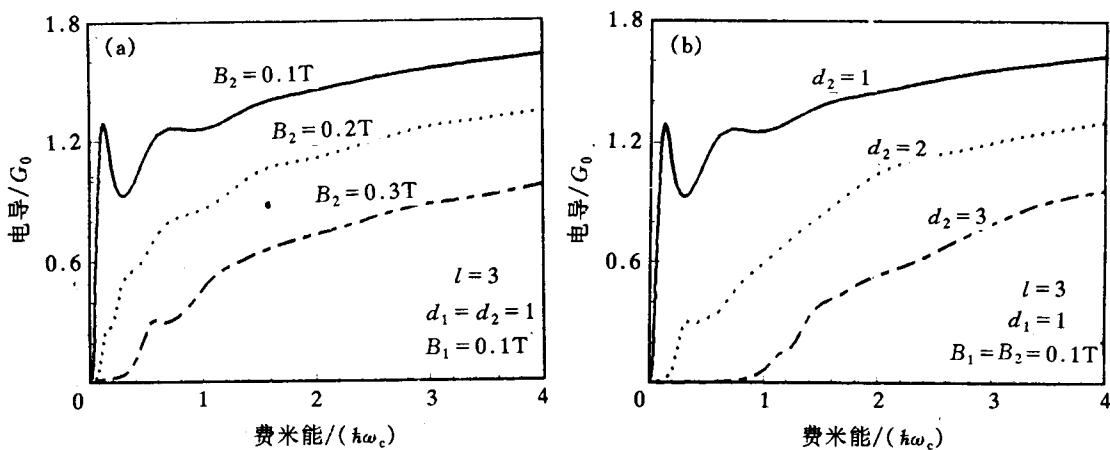


图 3 电子入射对称和非对称双磁势垒结构的电导率随费米能的变化

文献[4]中的图 6(a)), 这再次表明我们计算程序的正确性. 从图中我们清楚地看到, 在低费米能区, 电子渡越对称磁势垒结构, 其电导具有较强的、尖锐的共振峰, 而电子穿越非对称双磁势垒结构的电导却随右侧磁势垒高度或宽度的增加而强烈减小, 共振峰强烈衰减, 甚至

消失。并且结构越不对称，电导变得越小。从半经典的角度来看，这是由于增大右侧势垒的高度或宽度必然改变了电子运动的轨道，增大了结构的有效势，从而加剧了结构的不对称性，结果导致电子传输几率的减小和电导的衰减。

## 4 结论

电子隧穿非对称双磁势垒结构具有非常显著的非对称效应。和电子隧穿对称双磁势垒结构相比，在非对称双磁势垒结构中电子的传输几率和电导都显著减小。传输几率减小的程度强烈依赖于电子沿  $y$  方向波矢  $q$  的大小和取向。对具同一大小但  $q$  取向不同的电子，其传输几率随入射能量的变化迥异。由此我们得出“非对称双磁势垒结构具有比对称双磁势垒结构更强的波矢过滤特性”的重要结论。我们认为我们的这一发现对基于“磁势垒结构具有波矢过滤特性”原理的滤波器的设计具有指导意义。对于更复杂的磁势垒结构，我们研究的结果表明传输几率和电导具有更加丰富的振荡结构和性质（这部分结果我们将另文发表）。

## 参 考 文 献

- [1] M. A. McCord and D. D. Awschalom, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**: 2153.
- [2] K. M. Krishnan, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**: 2365.
- [3] S. J. Bending, K. von Klitzing and K. Ploog, *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65**: 1060.
- [4] A. Matulis, F. M. Peeters and P. Vasilopoulos, *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **72**: 1518.
- [5] J. Q. You, Lide Zhang and P. K. Ghosh, *Phys. Rev.*, 1995, **B52**: 17243.
- [6] M. Büttiker, *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**: 1761.
- [7] S. S. Allen and S. L. Richardson, *Phys. Rev.*, 1994, **B50**: 11693.

## Study on Tunneling Phenomena in Magnetic Barrier Structures

Guo Yong and Gu Binglin

(Department of Modern Applied Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Received 20 September 1996, revised manuscript received 30 October 1996

**Abstract** Effects of electron tunneling through asymmetric double-barrier magnetic nanostructures are inspected with transfer-matrix method. It is found that comparing with electron tunneling through symmetric double-barrier magnetic structures, both the transmission and the conductance are drastically reduced for electron tunneling through asymmetric double-barrier magnetic structures, and the asymmetric magnetic structure possesses stronger wave vector filtering properties.

PACC: 7340G