

文章编号:1001-9014(2006)03-0233-03

Aharonov-Bohm 环上联结 stub 介观结构的 Fano 共振效应

黄有利, 肖景林

(内蒙古民族大学 物理与机电学院, 内蒙古 通辽 028043)

摘要:采用量子波导理论研究了 Aharonov-Bohm 环上臂联结 stub 介观结构中的电子输运性质. 发现电子透射系数随 stub 长度和环的大小而周期振荡, 能使电子输运达到 100%. 当系统结构确定不变时, 研究了入射电子费米能量与电子透射几率的关系, 结果发现当入射电子能量为某一值时, 出现 Fano 共振效应; 而且发现当入射电子能量以及环长度给定的情况下, 适当调整 stub 长度和磁通量的大小也会导致 Fano 共振效应的出现.

关键词:量子波导理论; Fano 共振效应; 电子输运; 介观结构

中图分类号: O469 **文献标识码:** A

FANO RESONANT PROPERTIES OF ELECTRON IN AHARONOV-BOHM RING WITH A STUB

HUANG You-Li, XIAO Jing-Lin

(College of Physics and Electromechanics, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028043, China)

Abstract: A quantum waveguide theory is applied for the transport property of the electron in Aharonov-Bohm ring with a stub in the upper arm. It is found that the transmission coefficient of electron in Aharonov-Bohm ring with a stub oscillates with changing the length of the stub and the length of the ring. The transmission coefficient of the electron can be modulated up to 100% by the stub, and it is very interesting to find that the Fano resonance effect will be happen at some value of the incidence electron Fermi energy on condition that the length of stub, perimeter of ring and the magnetic flux are given. The Fano resonance effect can be modulated by the length of stub, and weakened by the increasing magnetic flux ϕ for a given Fermi energy of incidence electron.

Key words: quantum waveguide theory; Fano resonance effect; electron transport; mesoscopic structure

引言

自 80 年代以来, 随着外延技术的进一步发展及光学和电子束微刻技术的日趋完善, 人们已经能够制造出各种具有高电子迁移率的亚微米尺度的微结构器件. 在毫 K 的低温下, 电子的位相相干长度可达微米以上, 超过了微结构的尺度. 这种系统中电子的物理性质完全受量子力学规律所支配. 通常, 人们把这种尺度相当于或小于位相相干长度但比单个原子、分子的尺寸大得多的系统称做介观系统. 由于介观系统中的物理特性完全受量子干涉的影响, 所以介观结构中的电子输运特征是介观结构研究中的一个重要的物理问题, 也是构想、设计和制作量子器件

的物理依据. 其中最有趣的是介观环中的持续电流特性. 这一问题引起了国内外学者的广泛关注, 随后进行了一系列理论与实验的研究, 包括对单环^[1]、双环^[2]以及多臂介观环^[3]结构中的持续电流特征的研究. 大量研究表明持续电流不仅存在于孤立介观环中, 而且存在与两端连接导线的介观环中. 对这一问题的研究随后产生了一系列的方法, 其中包括矩阵对角化方法、密度法、以及瓦尼尔晶格模型法等. 本文将采用介观结构中一维波导理论^[4,5]研究 Aharonov-Bohm 环上臂联结 stub 介观结构中电子输运性质. 更有趣的是发现 Aharonov-Bohm 环上臂联结 stub 的介观结构中出现 Fano 共振效应. 这是因为电子通过 Aharonov-Bohm 环上下两臂时, 在环的上

收稿日期: 2005-10-21, 修回日期: 2006-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10347004)

作者简介: 黄有利(1978-), 女, 内蒙古兴和县人, 硕士, 主要研究方向: 凝聚态光学性质.

Received date: 2005-10-21, revised date: 2006-02-20

臂 stub 中,电子产生局域态,而下臂电子是连续态,上臂局域态和下臂连续态的相互干涉产生了 Fano 共振效应.

1 理论方法

考虑一维介观结构,如图 1, x 轴为电子注入方向,单电子薛定谔方程为:

$$\left[\frac{\hbar}{2m^*} [\vec{p} + e\vec{A}/c]^2 + V(r) \right] \psi(r) = E\psi(r) \quad (1)$$

其中 A 是磁场 B 的矢势, $A = \nabla \times B$, 强度为 $A = \phi/r_1$, 以及 $\phi = B \times S$ 磁通量, 电子的能级为:

$$E = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left[k_{1,2} - \frac{e \cdot \phi}{\hbar \cdot c \cdot r_1} \right]^2 \quad (2)$$

根据能量守恒, 因此有:

$$k_1 = k + \frac{e\phi}{\hbar c r_1} \quad (3)$$

$$k_2 = k + \frac{e\phi}{\hbar c r_1}$$

我们假设波矢为 k 的电子由路径 1 入射, 经过环形一维介观结构, 如图 1, 则各路径波函数为:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= e^{ikx} + ae^{-ikx} \\ \psi_i &= a_i e^{ikx} + b_i e^{-ikx} \quad (i=2,3,\dots,6) \\ \psi_7 &= ge^{ikx} \end{aligned} \quad (4)$$

假设系统横向的尺度远远比系统纵向尺度小, 以至于由于横向限制势的影响而导致能级宽度远远比由于纵向限制势的影响而产生的能级宽度要大, 因此, 满足方程(1)的电子运动是一维的^[4]. 假设 ψ_i 是第 i 条路径的波函数, 根据波导理论要求:

(I) 结点处的波函数连续: $\psi_1 = \psi_2 = \psi_3 = \dots = \psi_i$, (5)

(II) 结点处流守恒: $\sum_i \frac{\partial \psi_i}{\partial x_i} = 0$. (6)

运用方程(5), (6) 给出的边界条件, 经过计算

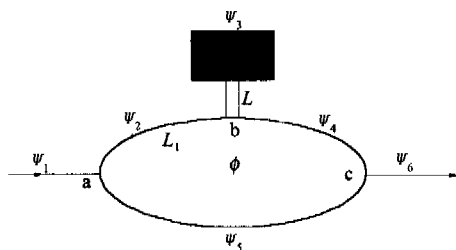


图 1 Aharonov-Bohm 环上臂联结 stub 的介观结构
Fig. 1 Aharonov-Bohm Mesoscopic structures sketch diagram upper arm of ring with one stub

我们可得出系数 a, g , 其中 a, g 分别为电子反射系数和透射系数.

2 结果和讨论

首先为了理解 stub 以及磁通量对电子输运的影响, 我们给出了在 stub 长度以及环周长给定的情况下, 磁通量与电子透射系数的关系曲线, 如图 2 所示. 图 2 给出了在 stub 长度 L 为 1.5nm, 环周长为 6nm 时, 电子透射系数与磁通量 ϕ 的变化曲线, 由图可以看出曲线为关于磁通量周期为 2π 非常对称的曲线, 且有两个峰, 这是因为磁场的加入破坏了电子态时间反演对称性的结果. 曲线形状与 Aharonov-Bohm 环中电子透射系数与磁通量 ϕ 的变化曲线相似. 为了更好的说明电子透射系数 $|g|^2$ 与 stub 长度 L 、环四分之一周长 L_1 的关系. 我们作了在磁通量 ϕ 为 π 时 $|g|^2 - KL - KL_1$ 的三维关系曲线, 如图 3, 由图可以看出透射几率 $|g|^2$ 与 stub 长度 L 、环四分之一周长 L_1 的关系曲线震荡比较大, 但有一定的周期性, 且电子透射系数可以达到 100%. 这是由于电子经过两条不同路径相互干涉而产生的, 是电子的量子特性的结果. 图 4 为给定 stub 长度 L 和环四分之一周长 L_1 时, 电子的透射几率与电子的费米能级的关系曲线, 由图可知, 电子的费米能级为某一特定值的时候, 出现 Fano 共振效应, 由于 Fano 共振是由连续态和分裂态相互干涉产生的, 在我们研究的结构中, 电子由左端入射, 可以经由两条路径传播, 一条沿着环的下臂直接传播, 传播态是连续的, 而另一条经由联结有 stub 的上臂, 适当选择 stub 的长度, 使电子在 stub 中形成局域态, 那么经由上臂传播的入射电子在一定的费米能量下, 使得 stub 中的局域态

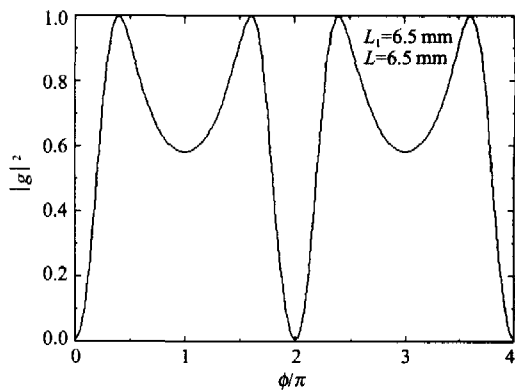


图 2 电子透射系数 $|g|^2$ 与磁通量 ϕ 的关系曲线
Fig. 2 The relation curve of transmission coefficient of electron $|g|^2$ with magnetic flux ϕ

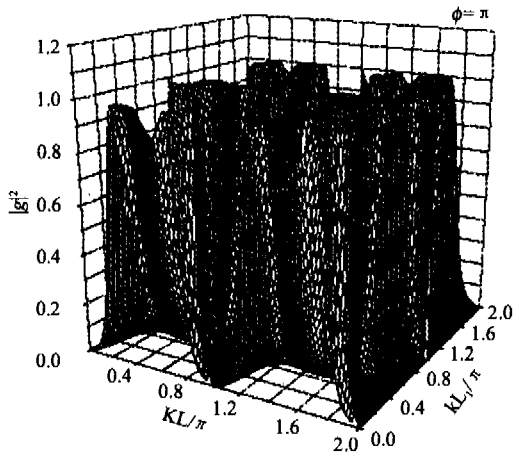


图3 电子透射几率 $|g|^2$ 与环四分之一周长 L_1 , stub 长度 L 的关系曲线

Fig. 3 The relation curve of the quarter of ring perimeter L_1 and the length of stub L to the transmission coefficient of electron $|g|^2$

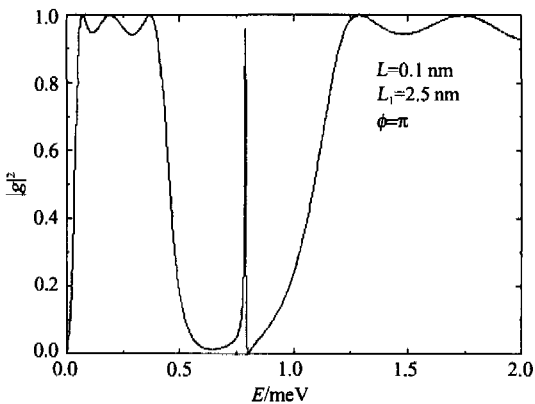


图4 入射电子的费米能量与电子透射几率的关系曲线
Fig. 4 The relation curve of Fermi energy of incidence electron to the transmission coefficient of electron

电子发生了游离,参与了运输.从而下臂连续电子态与 stub 中游离局域态电子发生干涉,出现了 Fano 共振效应.由图看出,在费米能大约为 0.788 meV 时,发生 Fano 共振效应.同样,我们可以通过改变 stub 长度 L 来实现 Fano 共振,如图 5,在磁通量分别为 $0, 0.1\pi, 0.3\pi, 0.5\pi$ 和 π 的几种情况下,stub 长度 L 与电子透射几率的关系曲线,由图可知,当 stub 长度 L 为某一值时,磁通量为 0 的情况, Fano 共振最为明显,随着磁通量的增加,峰谷高度增加且峰谷的宽度变宽, Fano 共振效应逐渐减弱.这是因为通过改变 stub 长度 L ,可以改变 stub 中电子的局域能级的大小,从而影响了 Fano 效应.而磁通量的增加,将影响电子在上下路径传播时的位相,因此影响了两

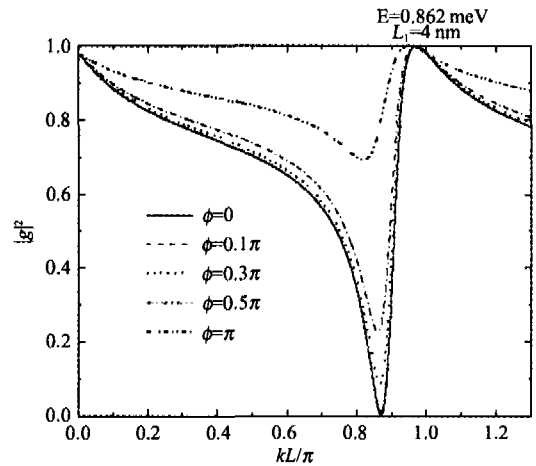


图5 stub 长度与电子透射几率的关系曲线

Fig. 5 The relation curve of the length of stub to the transmission coefficient of electron

列波的干涉.

3 结论

用量子波导理论研究了 Aharonov-Bohm 环上臂联结单 stub 的介观系统中电子运输的量子相干运输,发现电子透射系数随 stub 长度和环的大小而周期地振荡,能使电子运输达到 100%,还给出了入射电子的能量与电子透射几率的关系曲线,结果表明当入射电子的能量为某一特定值时,出现 Fano 共振效应.此外,还发现当入射电子能量给定时,调制 stub 的长度以及磁通量的大小也可以出现 Fano 共振效应.我们研究的结果不仅对理论的研究有一定的价值,而且对实验也将有一定的参考意义.

REFERENCES

- [1] Jayannavar A M, Singha Deo P. Persistent currents in the presence of a transport current [J]. *Phys. Rev B*, 1995, **51** (15):10175—10178.
- [2] Park W, Hong J. Analysis of coherent current flows in the multiply connected open Aharonov-Bohm rings [J]. *Phys. Rev B*, 2004, **69** (6):035319—1—035319—7.
- [3] WU Han-Chun, GUO Yong, CHEN Xin-Yi, et al. Giant persistent current in a quantum ring with multiple arms [J]. *Phys. Rev B*, 2003, **68** (18):125330—1—125330—5.
- [4] XIA Jian-Bai. Quantum waveguide theory for mesoscopic structures [J]. *Phys. Rev B*, 1992, **45** (7):3593—3599.
- [5] WEI Hong-Zhen, YU Jin-Zhong, ZHANG Xiao-Feng, et al. Simple method for estimating minimum bend radii of SOI single mode curved rib waveguides [J]. *J. Infrared Millim Waves* (魏红振,余金中,张小峰,等.估算 SOI 单模脊形弯曲波导最小弯曲半径的简单方法.红外与毫米波学报), 2001, **20** (5):398—400.