

库仑阻塞现象及其在纳米电子器件中的应用

柳福提^{1,2}, 程晓洪¹

(1. 宜宾学院 物理与电子工程学院, 四川 宜宾 644007;

2. 宜宾学院 计算物理四川省高校重点实验室, 四川 宜宾 644007)

摘要:对单隧穿结和双隧穿结中的库仑阻塞现象进行了介绍, 分析了其中电子隧穿的物理过程; 然后探讨在单电子盒中如何利用库仑阻塞控制单电子隧穿的物理原理; 最后介绍库仑阻塞效应在单电子晶体管中的具体应用及其发展前景。

关键词:隧穿结; 库仑阻塞; 单电子隧穿; 单电子晶体管

中图分类号: O 469

文献标识码: A

文章编号: 1000-0712(2013)07-0033-04

随着分子束外延及自组织生长技术的发展, 人们可以制作尺寸为纳米级的结点结构. 电子在纳米结点处传输时产生的新现象, 对已发展到亚 100 nm 的硅基集成电路产生了重要影响. 隧穿是电子在介观体系中表现的主导方式, 量子效应的影响使传统电子器件受到新的挑战. 早在 1951 年, Gorter 观察到颗粒金属的电阻随温度下降表现出反常增加的行为, 提出在低温和小电压下, 构成电容的两个中性导体之间将由于库仑排斥作用其电导将为零^[1], 这就是最早提出的库仑阻塞现象. 随着微细加工技术的发展, 后来 Fulton^[2], Van Benthum^[3], Scott Thomas^[4] 等人相继在金属、半导体微结构中也观察到了库仑阻塞现象. 随后引起了许多研究者的兴趣, 库仑阻塞很快成为凝聚态物理研究中的热点问题之一, 从而为物理学研究开辟了新的领域——介观物理学. 以电子隧穿与库仑阻塞效应为基础发展出了许多新型的单电子器件, 既可以大大减小电子器件的尺寸, 又可以提高运算速度与电路集成度, 还能有效降低功耗. 这种利用库仑相互作用控制电子隧穿行为的小尺寸单电子器件的应用前景令人鼓舞, 成为新一代电子器件的发展趋势. 本文结合普通物理电磁学与量子力学知识, 简要介绍库仑阻塞现象, 讨论库仑阻塞的物理机制, 分析单电子隧穿的控制过程及其在纳米器件中的应用, 对纳米器件的应用前景进行展望, 希望能为介观物理的学习与研究提供参考.

1 库仑阻塞现象

两个金属微粒之间转移电子可以等效于在平行板电容器中电子从一极板隧道穿过介质进入另一极板, 如果极板电荷增加了 e , 它将导致电容器静电能增加 $E_c = e^2/2C$, 而电压改变为 $\Delta V = e/C$. 对于宏观平行板电容器来说, 在一般情况下, 电子隧穿产生的电压变化对总电压没有什么影响. 但是, 如果当极板尺度减小至亚微米量级, 电子隧穿导致增加的静电能超过电子的热能时, 静电能就会阻止电子从一个极板隧穿到另一极板, 这一现象就称为库仑阻塞效应^[5]. 电子从一极板通过介质隧穿到另一极板, 中间介质相当于有一个等效电阻 R_T , 它与电容 C 所构成的电路的时间常数为 $\tau_T = R_T C$, 因而在隧穿过程中由于量子涨落引起的能量涨落为 $\Delta E \approx h/\tau_T = h/R_T C$. 对于纳米级结点而言, 发生库仑阻塞现象要具备两个条件: 第一个条件是热涨落的影响要小, 满足 $k_B T \ll E_c = \frac{e^2}{2C}$, 即相当于要求温度足够低, 电容足够小, 库仑静电能才能起关键作用; 第二个条件是量子涨落能量要小, $\frac{h}{R_T C} \ll \frac{e^2}{2C}$, 即隧穿电阻 $R_T \gg \frac{h}{e^2} \approx 25.8 \text{ k}\Omega$.

2 单隧穿结的库仑阻塞

由于电子隧穿而增加的静电能将会阻止下一个

收稿日期: 2012-10-22; 修回日期: 2013-01-14

基金项目: 四川省 2011 年“高等教育质量工程项目”、宜宾学院自然科学基金项目(2012S12)资助

作者简介: 柳福提(1978—), 男, 湖南武冈人, 宜宾学院物理与电子工程学院副教授, 博士研究生, 主要从事统计物理教学与电子输运研究工作.

电子的隧穿,因此,如果要形成持续电流的话,就必须在电流源的驱动下对结点电容器充电,使电子获得足够的能量使电子继续发生隧穿.下面就来分析单隧穿结的库仑阻塞效应,探讨其 $I-V$ 曲线特性.单个隧穿结的具体电路如图 1 所示^[5].

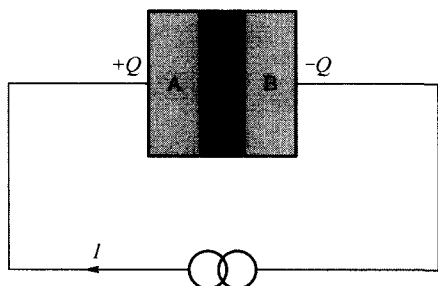


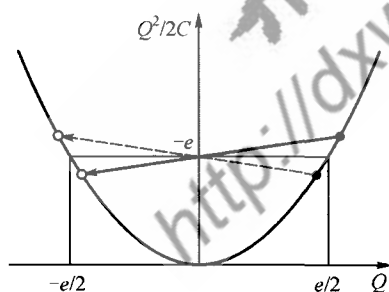
图 1 电流源驱动的隧穿结

假设极板 A 上有电荷 Q , B 板上有电荷 $-Q$, 当有一个电子隧穿离开 A 板, 这时系统静电能改变为

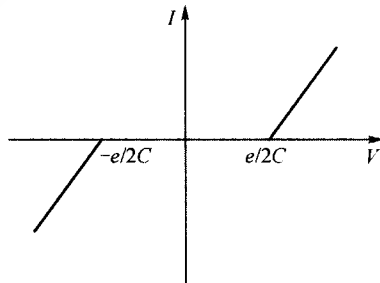
$$\Delta E = \frac{Q^2}{2C} - \frac{(Q+e)^2}{2C} = -\frac{e}{C} \left(Q + \frac{e}{2} \right) \quad (1)$$

若 A 板上得到一个电子, 则系统静电能改变为

$$\Delta E = \frac{Q^2}{2C} - \frac{(Q-e)^2}{2C} = -\frac{e}{C} \left(Q - \frac{e}{2} \right) \quad (2)$$



(a) 充电能与电量的关系



(b) 电流-电压关系

图 2 单隧穿结

3 源-岛-漏双隧穿结

为了有效克服库仑阻塞来实现电子的隧穿过程, 需要在绝缘隙中增加一个电极, 假定在源与漏极之间的绝缘隙中间放置一个岛状电极, 常被称为库仑岛, 它被绝缘体包围, 结构如图 3 所示. 在这个结构中, 电子隧穿从源到漏要通过两个隧穿结, 即为双隧穿结.

库仑岛的静电势 V 受放置在近邻的栅极上的电压 V_g 控制, 即 $V = Q/C + V_g$, 其中 C 是岛的电容, Q 为岛上的静电荷量, Q/C 为岛上静电荷的静电势, 库仑岛的静电能 E 为

在绝对零度或温度较低时, 忽略电子的热涨落能, 自发的隧穿过程必然朝有利于能量降低 ($\Delta E < 0$) 的方向进行, 即可由式 (1) 得 $Q < -e/2$ 或由式 (2) 得 $Q > e/2$, 电子就可以发生隧穿. 换句话说就是如果电量满足条件 $-e/2 < Q < e/2$, 结点就可能发生库仑阻塞^[6]. 当 Q 值超过阈值 $e/2$, 电子发生隧穿, Q 值下降到 $-e/2$, 隧穿停止, 于是电流源开始对结点电容器充电, 直到电量 Q 超过阈值, 第二个电子发生隧穿, 如此循环变化. 若隧穿结的偏电压太小不足以提供结电容单个电子变化所需要的能量时, 电子不能通过, 电流为零. 电量变化过程如图 2(a) 所示, 其中虚线对应的过程是被禁止的. 当偏压足够大使结点电容器上的电量 $Q > e/2$ 时, 结电容上的电子就可以通过隧穿结, 如实线所示过程, 此时结电容上的电子数由 $e/2$ 变为 $-e/2$. 有电流流过隧穿结的阈值电压为 $|V| > e/2C$, 若偏压进一步增大, 结电容中单电子充放电过程都能发生, 通过隧穿结的电流线性增大 (结电阻不变), 其电流-电压特性曲线如图 2(b) 所示, 这就是单隧穿结的库仑阻塞现象^[7]. 但在实际情况中, 由于引线间杂散电容远大于隧穿结电容, 很难观测到单隧穿结的库仑阻塞现象^[5], 而可观察到库仑阻塞现象的最简单结构是双隧穿结.

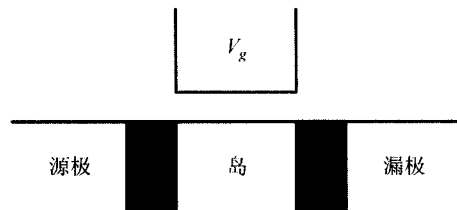


图 3 库仑岛结构示意图

$$E = \int_0^Q V dQ = \frac{Q^2}{2C} + QV_g = \frac{(Q + CV_g)^2}{2C} - \frac{CV_g^2}{2} \quad (3)$$

岛上的电荷应该是电荷的整数倍, 即 $Q = -Ne$. 如果岛上电荷由于隧穿增加一个电子, 电荷变为 $-(N+1)e$.

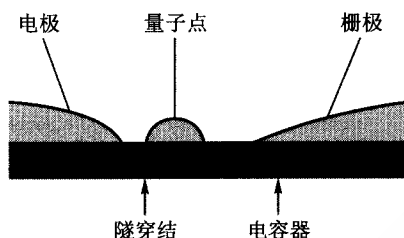
1) e , 这时岛的静电能增加量 ΔE 为

$$\Delta E = \frac{[(2N+1)e - 2CV_g]e}{2C} \quad (4)$$

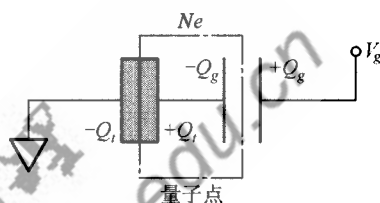
隧穿过程要自然发生的话, 要求 $\Delta E < 0$, 即 $V_g > (N + \frac{1}{2}) \frac{e}{C}$. 同理, 如岛上由于隧穿减少一个电子, $V_g < (N - \frac{1}{2}) \frac{e}{C}$. 所以, V_g 满足

$$(N - \frac{1}{2}) \frac{e}{C} < V_g < (N + \frac{1}{2}) \frac{e}{C} \quad (5)$$

的条件范围内, 电子隧穿库仑岛的现象被控制了^[5], 在此条件下电流不变, 电流-电压特性曲线将表现为阶梯形状^[8], 这种现象也得到了实验验证



(a) 结构示意图



(b) 等效电路图

图4 单电子盒

这种结构由一个量子点和两个电极构成, 其中一个电极与量子点构成隧穿结, 另一个电极就是栅极, 通过绝缘介质与量子点耦合. 在足够低的温度下, 如果栅极电压满足

$$(N - \frac{1}{2}) \frac{e}{C} < V_g < (N + \frac{1}{2}) \frac{e}{C} \quad (6)$$

纳米岛中的电子数 N 就保持稳定状态. 通过改变栅极电压的大小, 可以改变岛中的电子数 N . 如对栅极施加一个正的偏压 V_g , 当它超过某个阈值时, 纳米岛就能够得到一个电子, 静电荷数就为 1; 继续增加到另一个值时, 岛上的静电荷数可以变为 2. 所以在一个单电子盒中, 通过栅极电压可以控制纳米岛上电子一个一个的出入^[1]. 这种实现纳米岛上电子数目控制的单电子盒,

实^[9,10]. 假设岛上静电荷数为 1, 则库仑岛的电子费米能达到 $e^2/2C$, 而岛的单电子充电所增加的静电能为 $e^2/2C$, 静电能的改变量足以阻止随后的第二个电子从另一个隧穿结进入同一个岛, 只有当前的一个电子离开后下一个电子才能进入岛中, 因此可以利用库仑阻塞效应来控制结点的单电子隧穿.

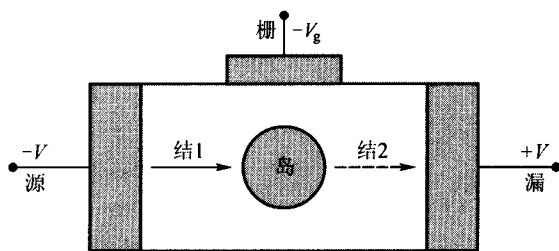
4 单电子盒

基于库仑岛的库仑阻塞效应实现单电子隧穿的最简单的单电子器件的结构如图 4 所示, 也称之为单电子盒.

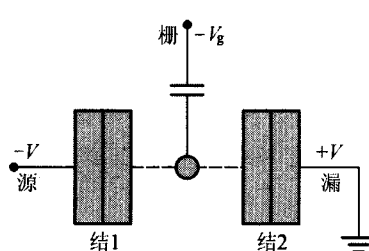
就是基于库仑阻塞效应进行单电荷操作的最简单的电子器件, 它的重要意义在于可以对其他基于库仑阻塞效应的单电子器件的原理进行很好的解释.

5 单电子晶体管

随着技术的发展, 继单电子盒后, 很快就开发出了三端开关器件. 它是在源极-库仑岛-漏极的双隧穿结的基础上, 通过在与库仑岛相连接的电容上添加第三个电极, 即为门电极, 构成三极管的装置. 从源电极到漏电极的电流不仅依赖于源漏之间的电压 V , 还依赖于门电压 V_g , 电流 I 可以通过 V_g 控制, 这种基于库仑阻塞效应的三极管就是单电子晶体管, 基本结构及其等效电路如图 5 所示.



(a) 基本结构图



(b) 等效电路图

图5 单电子晶体管

这种结构与金属-氧化层-半导体场效晶体管(MOSFET)非常类似,只是用隧穿结代替了 MOSFET 中的 p-n 结,用纳米岛代替了 MOSFET 中的沟道区域,但工作原理与 MOSFET 大不相同.运用与电子盒中类似的方法,可以推出单电子晶体管中纳米岛上静电荷数 N 保持稳定的条件,源区隧穿结发生库仑阻塞的条件为

$$\frac{1}{C_D} \left[\left(N - \frac{1}{2} \right) e - C_g V_g \right] < V_D < \frac{1}{C_D} \left[\left(N + \frac{1}{2} \right) e - C_g V_g \right] \quad (7)$$

漏区隧穿结库仑阻塞的条件为

$$-\frac{1}{C_S + C_g} \left[\left(N - \frac{1}{2} \right) e - C_g V_g \right] < V_D < \frac{1}{C_S + C_g} \left[\left(N + \frac{1}{2} \right) e - C_g V_g \right] \quad (8)$$

电流 I 对 V_g 非常敏感,当极化电荷有一个很小的变化时,就可以导致电流 I 产生很大的变化,因此单电子晶体管可以应用于高灵敏静电计的制造,也可以用来制造低噪声模拟信号放大器.与传统的 MOSFET 器件相比,单电子晶体管在工作过程中仅仅涉及到单个电子或者几个电子,对于降低集成电路的功耗非常有利.另外单电子晶体管的纳米岛可以是量子点,达到原子尺度,对于提高集成电路的集成度具有潜在的巨大优势.

随着纳米技术的迅猛发展,人们已开始把先进的材料制备和加工技术应用于单电子输运器件,除了多隧道结的金属单电子器件外,还研制出了一系列的半导体单电子器件. Takahashi^[12] 等利用半导体微细加工工艺在 SOI 基片上制备硅量子点并制作了单电子晶体管, Uchida^[13] 等提出了单电子晶体管逻辑电路设计方法. 单电子晶体管是通过控制单电子运动来放大量子信号,从而可以实现量子计算机中的量子比特存取与运算,有利于高速并行计算,具有目前计算机所无法比拟的特性.

6 展望

由于传统的集成电路已经达到其物理极限,就必须寻求新的方法和器件来进一步提高集成度. 基于库仑阻塞的单电子隧穿的单电子器件将成为未来电子技术发展的重要方向,自从单电子晶体管问世以来得到了广泛的关注与研究,并不断向前发展. 单电子晶体管的电学测量的温度由毫开(mK)量级直到室温,常见器件种类已包括金属、超导、有机物、半导体等单电子晶体管. 低维的单电子器件的输运性质揭示了介观物理学领域中电子输运的新特性,再加上单电子器件的广

阔应用前景^[14],如单电子晶体管、量子点旋转门、单电子数字逻辑电路、存储器等^[15],引起了国内外量子计量、纳米材料和技术、量子输运等领域许多研究者的研究兴趣. 我们相信,在跨学科领域研究者的共同努力下,基于库仑阻塞效应的纳米器件的应用发展必将迎来灿烂的春天,使量子计算机的普及很快成为现实!

参考文献:

- [1] Gorter C J. A Possible Explanation of the increase of the electrical resistance of thin metal films at low temperatures and small field strengths [J]. physics, 1951, 17: 777-780.
- [2] Fulton T A, Dolan G J. Observation of single-electron charging effects in small tunnel junctions [J]. Phys Rev Lett, 1987, 59(1): 109-112.
- [3] van Benthum P J M, Smokers R T M, van Kempen H. Incremental Charging of Single Small Particles [J]. Phys Rev Lett, 1988, 60: 2543-2546
- [4] Scott-Thomas J H F, Field S B, Kastner M A, et al. Conductance Oscillations Periodic in the Density of a One-Dimensional Electron Gas [J]. Phys Rev Lett, 1989, 62: 583-586
- [5] 陆栋,蒋平,徐至中. 固体物理学[M]. 上海:上海科学技术出版社,2003.
- [6] 阎守胜. 现代固体物理学导论[M]. 北京:北京大学出版社,2008.
- [7] 王太宏. 纳米器件与单电子晶体管[J]. 微纳电子技术, 2002, 1: 28-32.
- [8] 郭维廉. 固体纳米电子器件和分子器件[J]. 微纳电子技术, 2002, 4: 1-7.
- [9] Barner J B, Ruggiero S T. Observation of the incremental charging of Ag particles by single electrons [J]. Phys Rev Lett, 1987, 59: 807.
- [10] Wilkins R, Ben-Jacob E, Jaklevic R C. Scanning-tunneling-microscope observations of Coulomb blockade and oxide polarization in small metal droplets [J]. Phys Rev Lett, 1989, 63: 801.
- [11] 朱长纯,贺永宁. 纳米电子材料与器件[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [12] Takahashi Y, Namatsu H, Kurihara K, et al. Size dependence of the characteristics of Si single-electron transistor on SIMOX substrates [J]. IEEE Trans, Electron Devices, 1976, 43: 1213-1217.
- [13] Uchida K, Matsuzawa K, Toriumi A. A new design scheme for logic circuits with single electron transistors [J]. Jpn J Appl Phys, 1999, 38: 4027-4032.

(下转 43 页)

Investigation of diffusion of chemical elements in rotating stars

SONG Han-feng^{1,2,3}, LI Yun¹

(1. College of Science, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

2. Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650011, China;

3. Joint Research Centre for Astronomy, National Astronomical Observatory-Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: Three diffusion coefficients which can affect the diffusion process are calculated. The effects of the chemical elements mixing are given according to the diffusion equation of the chemical elements. It is shown that meridional circulation is the main driving mechanism for the transport of angular momentum while shear turbulence is the main driving mechanism for the transport of chemical elements. The larger horizontal turbulence tends to increase diffusion efficiency of meridional circulation and shear turbulence. The diffusion effect favours the transportation of helium and nitrogen to the surface of rotating stars and a large convective core. The diffusion of the chemical element can make the star to have a higher luminosities and a lower temperature in the center of the star and have an important effect on the structure and evolution of the star.

Key words: stellar structure and evolution; rotation; chemical elements diffusion

(上接 36 页)

- [14] 郑厚植. 半导体纳米结构中的库仑阻塞现象[J]. 物理, 1992, 21(11): 646-653.
- [15] 梁励芬, 蒋平, 王迅. 用扫描隧道显微术实现室温下的单电子隧穿效应[J]. 物理, 1994, 23(7): 420-425.

Coulomb blockade phenomenon and its application in the electronic nanodevices

LIU Fu-ti^{1,2}, CHENG Xiao-hong¹

(1. School of Physics and Electronic Engineering of Yibin University, Yibin, Sichuan 644000, China;

2. Computational Physics Key Laboratory of Sichuan Province of Yibin University, Yibin, Sichuan 644000, China)

Abstract: The coulomb blockade effect in the single tunnel junction and dual tunnel junction is introduced and the physical process of single electron tunneling is analyzed. We discuss the principle that how to control the single electron tunneling with coulomb blockade in single electron box. The specific application of coulomb blocking effect in the single electron transistor and its development prospect are also introduced.

Key words: tunnel junction; coulomb blockade; single electron tunneling; single electron transistor