

图9 30个单元激光阵列的远场花样^[4]
(a) 有空间滤光器; (b) 无空间滤光器

我们用图8的示意图看看如何运用这一理论进行锁相。在距阵列激光源 D^2/λ 处放置一空间滤光器,使最低阶模的像落在滤光器的无铬膜的地方,这样空间滤光器对最低阶模无影响。最高阶模的像正好落在铬膜上,因而受到衰减,得到抑制。因此激光阵列的输出模式为最低阶模。注意使空间滤光器的平面稍微倾斜一点,以免从铬膜反射的光回到腔中。

图9是30个单元激光阵列的远场图。由

图9可以看出空间滤光器的作用。在没有空间滤光器的情况下同时存在最低阶模和最高阶模,而在有空间滤光器时则只存在最低阶模。

- [1] J. J. Yang et al., *Appl. Phys. Lett.*, **49**(1988) 1138.
- [2] C. Lei et al., *Appl. Phys. Lett.*, **58**(1991), 1122.
- [3] J. K. Butler, D. E. Ackley and D. Botez, *Appl Phys. Lett.*, **44**(1984), 293.
- [4] F. X. D'Amato, E. T. Siebert, and C. Roychowdhuri, *Appl. Phys. Lett.*, **55**(1989), 816.

用扫描隧道显微术实现室温下的单电子隧穿效应

梁励芬 蒋平 王迅

(复旦大学李振道物理学综合实验室,应用表面物理国家重点实验室,上海 200433)

单电子隧穿效应通常只能在低温下实现。最近,采用扫描隧道显微术在纳米尺度的范围内实现了室温单电子隧穿,清晰地观察到了库仑阻塞现象和库仑阶梯特性。这是单电子隧穿研究中的重大进展,将在简要叙述单电子隧穿物理过程的基础上予以介绍。

单电子隧穿是在介观体系中出现的物理现象。早在1951年, Gorter 观察到颗粒状金属的电阻随温度下降表现出反常增加的行为,他解释为每个金属微粒相互之间存在隧穿势垒。这就是最早提出的单电子隧穿效应,但当时并没有产生很大的影响^[1]。过了30多年,直到80

年代后期,随着微细加工技术的发展,美国 Bell 实验室的 Fulton 和 Dolan^[2], 荷兰 Nijmegen 大学的 Van Benthum 等人^[3], 以及美国 MIT 的 Scott Thomas 等人^[4]相继在金属和半导体微结构中观察到了库仑阻塞现象。单电子隧穿效应才重新又受到人们的注意,并很快成为凝

聚态物理研究中的一个热点。以这一效应为基础，发展了许多新型的单电子器件原型。人们惊奇地发现，在一个介观尺度的体系内，可以做到让电子“排好队”逐个地通行，并使它们按照需要来实现一定的器件功能。目前随着电子器件结构的进一步超小型化，量子效应的影响使传统的电子器件受到新的挑战，单电子器件有可能成为新一代电子器件的重要成员。甚至有人预言，21 世纪电子学将建筑在单电子器件的基础上。

一、什么是库仑阻塞和库仑阶梯

库仑阻塞现象已经在本刊第 21 卷第 11 期上有过介绍^[5]。这里我们再简明地描述其中的物理过程。

顾名思义，单电子隧穿就是让电子一个挨一个地通过介观尺度的结构，犹如门诊医生招呼挂号病人一样，所以 Harmans 在他所撰写的综述论文中用的题目就叫做《下一个电子请过来》^[6]。

究竟如何才能让电子单个地通过呢？设想由两个金属电极夹一层介质组成的简单的电容器，介质层就是势垒区，阻止电荷通过，但当介

质足够薄（几个 nm）时，负极板上的电子由于量子力学的隧穿效应能通过介质形成电流，故可以称它为隧道结。设开始时结的两极板上电荷为 Q 和 $-Q$ ，相应的静电能量为 $Q^2/2C$ 。如果一个电子由负极穿过介质到达正极，则正极电荷变为 $(Q - e)$ ，电容器的静电能变为 $(Q - e)^2/2C$ 。隧穿的发生一定要朝能量降低的方向进行，只有当 $(Q - e)^2/2C - Q^2/2C < 0$ 时，才可能发生隧穿过程。由此可得隧穿的条件为 $Q > e/2$ 。当 $Q < e/2$ 时，隧穿过程不能发生，静电场封锁了电子通道，这就是库仑阻塞效应。

如果在电容器两端接一恒流源对其充电，使极板电荷从零开始逐渐增加，当达到 $e/2$ 时，就有一个电子从负极隧穿到正极。图 1 显示了单个电子隧穿前后电容两极板上电荷的变化。这一过程使极板电压跃变 e/C 而降到 $-e/2C$ ，阻止了下一个电子的隧穿。但随着电流源继续对电容器充电，又使正极板上的电荷再次增到 $e/2$ ，电压达 $e/2C$ ，于是又有第二个电子隧穿到正极。只要电流源不停地工作，电容器极板上的电荷和电压就产生周期性的振荡，称为单电子隧穿振荡。振荡频率是 $f = I/e$ 。

如果不用恒流源，而是在隧道结两端用电

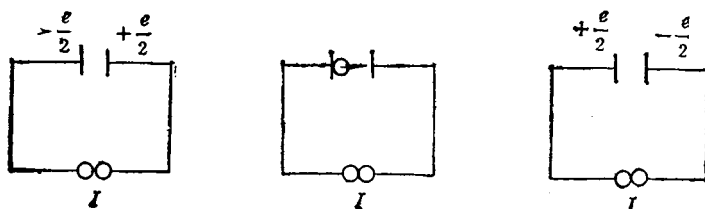


图 1 电子从负极隧穿到正极时电容两端电荷的变化

压源偏置，测量其电流-电压 ($I-V$) 特性，结果将是由于库仑阻塞效应，在 $|V| \leq e/2C$ 范围内没有电流流过，而超过此范围后，电流随电压近似地呈线性变化，如图 2 所示。在通常宏观体系中， $e/2C$ 数值极小，常可忽略，所以在 $I-V$ 特性中看不到这种阻塞现象。

下面进一步讨论由电压源偏置的两个隧道结串联的双势垒结构中电子的隧穿现象。如图

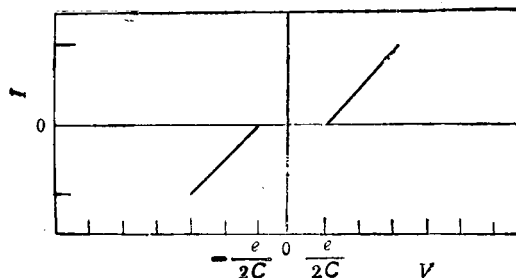


图 2 隧道结的伏安特性（库仑阻塞现象）

3(a) 所示, 常将两个结相联的部分称为“岛”。设当电压 V 加在这一串联结构上时, 与电源负端相连的隧道结(其势垒为电子入射端势垒)上的电压为 V_1 , 另一隧道结(出射势垒)上的电压为 V_2 , $V_1 + V_2 = V$ 。电子在入射势垒两端的势能差为 eV_1 。理论分析指出, 如果岛中引入一个电子, 系统的库仑能量要增加 $\Delta E = e^2/2(C_1 + C_2)^{[7]}$ 。如果 eV_1 小于 ΔE , 电子隧穿入射势垒进入岛区就会导致能量上升。这种过程是不可能发生的(库仑阻塞)。由此可见, 当外加电压较低时, 隧穿过程被库仑阻塞而不会有通过双势垒结构的电流。但是, 随着外加电压增加, eV_1 也随之增加, 当其值大于 ΔE 时, 库仑阻塞就被克服, 这时电流开始出现。如果外加电压继续增加, 每当入射势垒两端的势能变化 $e\Delta V_1$ 足以补偿岛上由于增多一个电子而引起的库仑能量的增加时, 进入岛中的电子数就增加一个 e 。换言之, 在 eV_1 能量范围内包含的岛上, 电子态的数目将随着外加电压逐一增加。如果双势垒结构极不对称(满足 $R_2 \gg R_1$ 和 $C_2 \gg C_1$ 的条件) 就会得到隧穿电流随 V 的增加呈现台阶形增长的特性, 即出现库仑阶梯。

粗略地讲, 电子对一个结的隧穿率与结的电容 C 和电阻 R 有关, 它们的数值越小, 隧穿率越大, 在双结情形, 如果入射隧道结的电容和电阻均远小于出射结, 则电子对入射势垒的隧穿率远大于出射势垒。在这一情况下, 岛中的电子数将尽可能保持其最大值, 而流过双结的电流则由岛中电子对出射势垒的隧穿率 $1/\tau$ 决定, τ 是平均单个电子隧穿出射势垒所需时间。一般而言, 流过双结的电流也同势垒上的电压有关, 因而随着 V 的增加, 它也会有所上升。但当岛内动态电荷积累由于 eV_1 范围充电态的增加而突然增加一个电子时, 电流便会跃升 e/τ , 从而形成台阶状库仑阶梯, 而 e/τ 也就是台阶的高度。

如果双结是对称的, 即两个隧道结相同, 则库仑阶梯将不出现, 结果类似于单结, 只有库仑阻塞现象。

图 3(b) 表示 $R_2 \gg R_1$, $C_2 \gg C_1$ 的不对称双结的库仑阶梯。

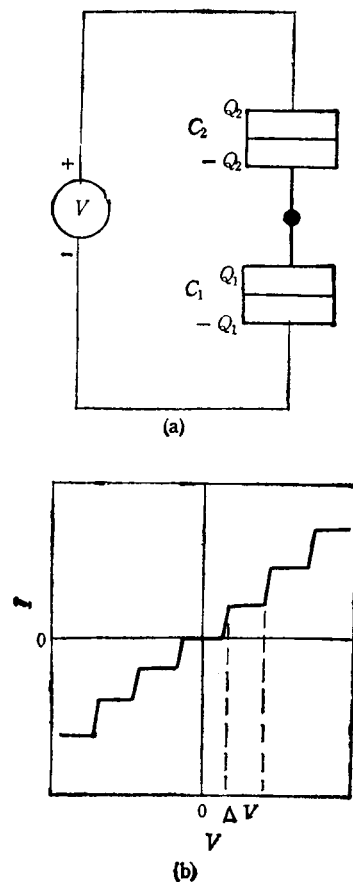


图 3 双隧道结及其伏安特性(库仑阶梯)

二、实现单电子隧穿的条件

要在实验上观察到单电子隧穿效应, 必须满足几个基本条件。

1. 隧道结的充电能量要远大于环境温度引起的热起伏的能量, 即要求 $e^2/2C \gg kT$, k 是玻耳兹曼常数, T 是绝对温度。因此, 若要在室温下观察单电子隧穿, 则隧道结的尺寸必须在纳米量级。

2. 隧道结的电阻 R 应远大于电阻量子 R_K , $R_K = \hbar/e^2$ 。根据量子力学的测不准原理, 能量不确定性 $\Delta E' \sim \hbar/RC$, 如 $\Delta E'$ 超过静电能量就会掩盖单电子隧穿效应。所以, 必须满足 $\hbar/RC \ll e^2/2C$, 或 $R \gg \hbar/e^2$ 。

3. 由于隧道结的引出线有较大的杂散电容 C_L , 通常比结电容大得多, 且金属引线又受到无处不在的电磁场的量子起伏的影响, 这将严重干扰单电子隧穿效应. 避免这种干扰的最简单方法之一, 就是把几个隧道结串联起来互相保护^[6].

三、怎样实现室温单电子隧穿

虽然 80 年代中期即有单电子器件面世, 但由于是用亚微米技术制作的, 电容较大, 要观察隧穿效应必须低温. 例如, 当结的线度为 100nm, 面积为 $0.01\mu\text{m}^2$ 时, 结电容为 10^{-17}F 的数量级, $e^2/2C$ 约为 10^{-21}J 的量级, 要满足 $e^2/2C \gg kT$, T 必须低至 3K 左右. 为了进一步减小隧道结的尺度, 有人用扫描隧道显微镜 (STM) 的针尖置于一个隧道结上构成双隧道结结构, 针尖即成为另一隧道结的外侧电极, 如图 4 所示, 并在 4K 的低温下测到明显的库仑

阻塞和库仑阶梯特性^[7]. 针尖对应的电容极小, 提供了在室温观察单电子隧穿现象的可能性. 果然, 最近荷兰飞利浦实验室的 Van Houten 和他的小组进一步用这种结构首次在室温下实现了单电子隧穿现象的观察^[9].

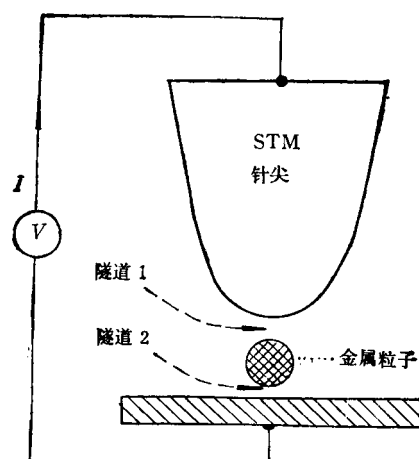
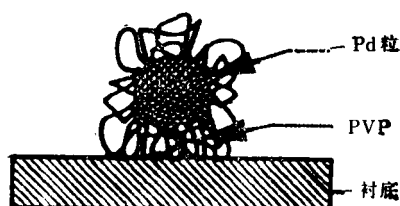


图 4 STM 双隧道结构



(a)



(b)

图 5 两种样品的结构图

他们制作的样品有两种类型, 其结构如图 5 所示. 样品 a 是在云母片衬底上淀积一层 100nm 厚的金膜, 然后在其上淀积 1nm 厚的 ZrO_2 (氧化物隧道), 最后, 再淀积 2\AA 厚的金膜 [图 5(a)], 这样薄的金层会自动成团而形成直径在 4—5nm 左右的小颗粒, 将 STM 针尖置于其上, 就构成双隧道结. 其中金粒-衬底结的电容为 C_2 , 由于 ZrO_2 有较大的介电常数 ($\epsilon_2 \approx 10$), 故 C_2 比针尖和金粒组成的电容 C_1 大得多. 估计总电容为 $C = C_1 + C_2 \approx 10^{-18}\text{F}$, 相当于 $e^2/2C \approx 70\text{meV}$, 在室温下就能满足 $e^2/2C \gg kT$ 的条件 (300K 时, $kT \approx 26\text{meV}$).

物理

样品 b 是用胶体化学的方法制备的 [图 5(b)]. 在水溶性的聚合物 PVP (polyvinylpyrrolidone) 中将 Pd^{++} 还原成 Pd (钯). Pd 原子逐渐聚集成一个个颗粒, 而聚合物 PVP 则吸附在 Pd 粒上, 一来阻止 Pd 粒体积继续增长, 还可防止溶液胶凝成絮状. 实验中预先用表面活性剂对导电衬底-金膜进行特殊处理, 以使聚合物能吸附在衬底上, 这样当把金膜衬底浸入到聚合物溶胶中时, 被聚合物包裹起来的钯粒就牢牢地附着在金膜衬底上, 钯粒外的聚合物壳就成为钯粒-金膜隧道结中的介质. 这种制备方法的优点是可以通过改变聚合物 PVP

的浓度来控制钽粒的体积,从而控制隧道结的电容.透射电子显微镜观察表明, Van Houten 等人的钽粒的平均直径约为 2nm. 估计钽粒-聚合物-金衬底的电容约为 4×10^{-19} F ($\epsilon_r \approx 3 \sim 4$), 相应的充电能量 $e^2/2C \approx 0.28$ eV, 也满足室温观察单电子隧穿的要求.

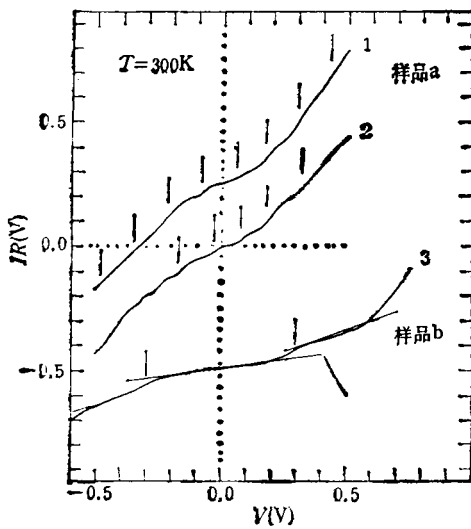
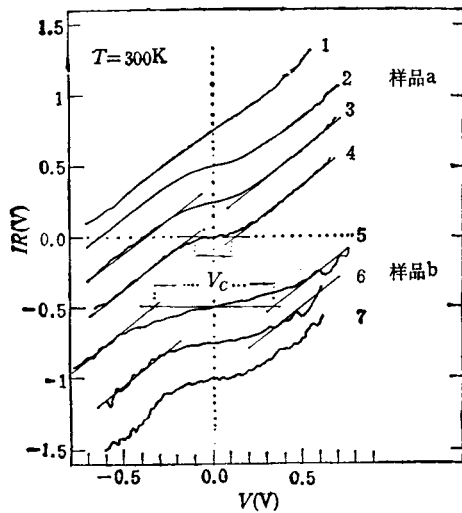


图 6

(a) 对称结在室温下的库仑阻塞;
(b) 非对称结在室温下的库仑阶梯

图 6 为在室温大气中对上述两种双隧道结测量所得的 $I-V$ 特性. 图 6(a) 为对称双结的结果, 其中曲线 1 是在没有金属粒子的氧化物-衬底上测得的结果, 基本上是电阻型的. 曲

线 2~4 是对样品 a 测量所得, 而曲线 5~7 则是用样品 b 测量所得. 虚线表示渐近线, 它们在横轴上的截距不在 $V = 0$ 处, 这就是库仑阻塞现象. 样品 a 的渐近线对原点位移了 ± 0.1 V, 样品 b 则位移了 ± 0.25 V. 图 6(a) 中用 V_c 表示左右两条渐近线间的水平偏移, 由 $V_c = e/C$ 可近似计算总电容 C . 从大量 $I-V$ 特性的分析中求得样品 a 的 V_c 值平均为 0.22 ± 0.05 V, 相应的 $C \approx 0.8 \times 10^{-18}$ F; 样品 b 的 V_c 平均值为 0.45 ± 0.2 V, 相应的 $C \approx 0.4 \times 10^{-18}$ F. 而根据粒子尺寸估计, 样品 a 和 b 的电容分别是 $C_a \approx 1.0 \times 10^{-18}$ F 和 $C_b \approx 0.4 \times 10^{-18}$ F. 两种方法所得的结果符合得很好. 图 6(b) 则为对非对称结的测量结果, 可以明显地看到库仑阶梯.

Van Houten 等人所采用的这种方法非常巧妙, 使实现单电子隧穿的工作温度一下子从液氮温度提高到了室温, 另一方面又为 STM 的大气工作开辟了一个新的应用途径.

单电子隧穿效应的发现为人们设计和制作各种单电子器件开辟了广阔的前景^[5], 已经制成了许多器件原型, 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. 单电子器件最诱人的应用是在数字集成电路方面. 在以单电子器件为基础的电路中, 信息是以单个电子的有无来表达的, 有人估计这将大大改善目前商用电子设备的速度和集成度. 除了在微电子方面的应用外, 还可利用库仑阶梯作为测量弱电流的标准, 估计精度可达 10^{-9} , 比现有设备高 1 000 倍; 也可以利用双隧道结的电流对岛上电荷极为敏感的特点做成超灵敏静电计等. 单电子隧穿效应的研究对人们有很强的吸引力, 但是要求在极低温工作(接近液氮温度)却严重限制了这类器件的研究和应用. 现在室温单电子隧穿效应的观察得以实现无疑是一个重要的突破, 对于进一步开拓这一领域的研究有着积极的意义. 然而, 要真正实现单电子器件的实用化还有许多困难, 需要有新的设计思想, 新的材料和新的器件制作方法以及新的检

测手段,但这些困难和需求也正是对人们的挑战,推动我们去不断地探索,使得科学和技术在不断的探索中永远前进。

- [1] K. Konstantin Likharev and Tord Claesson, *Scientific American*, 266-6(1992), 50.
- [2] T. A. Fulton and G. J. Dolan, *Phys. Rev. Lett.*, 59 (1987), 109.
- [3] P. J. M. Van Bentum, R. T. M. Smokers and H. Van Kempen, *Phys. Rev. Lett.*, 60 (1988),

2543.

- [4] J. H. F. Scott Thomas, et al., *Phys. Rev. Lett.*, 62(1989), 583.
- [5] 郑厚植,物理,21(1992),646.
- [6] K. Harmans, *Physics World*, 5-3(1992), 50.
- [7] R. Wilkins et al., *Phys. Rev. Lett.*, 63(1989), 801.
- [8] P. Delsing et al., *Phys. Rev. Lett.*, 63(1989), 1861.
- [9] C. Schönberger et al., *Physica Scripta*, in press.

扫描隧道显微学研究的最新进展

——STM '93 国际会议评述

高 凡 白春礼

(中国科学院化学研究所,北京 100080)

第七届国际扫描隧道显微学大会(STM'93)于1993年8月9日至13日在北京召开。大会共接收了550多篇论文摘要,中外学者400多人出席了大会。

大会按照不同的学科性质将报告内容划分为11个领域,分别为:(1)理论和模拟;(2)金属;(3)针尖一样品相互作用;(4)电化学;(5)有机材料;(6)半导体;(7)力显微学;(8)仪器;(9)纳米科学与技术;(10)生物学;(11)特殊效应。在开幕式后,由诺贝尔奖获得者、瑞士苏黎世IBM实验室的Heinrich Rohrer作了题为《基于探针方法的挑战》的主题报告,回顾了自STM问世以来十余年间,扫描探针显微学所取得的巨大成就,展望了其广阔的前景和面临的新的挑战。另一位诺贝尔奖获得者、德国慕尼黑IBM实验室的Gerd Binnig作了题为《原子力显微术相对于扫描隧道显微术的局限和机遇》的主题报告,着重阐述了原子力显微镜(AFM)相对于扫描隧道显微镜而言,虽然存在分辨率上的不足,但其更为广阔的应用领域则是其巨大优势。目前的研究结果表明,AFM在分辨率上正在逐渐赶上STM,而且AFM能够提供STM所不及的丰富信息。此后,几位著名科学家又作了精采的特邀报告。D. W. Pohl以《扫描近场光学显微术》为题,H. J. Güntherodt以《原子力显微术》为题,P. Hansma以《原子力显微术在生物学中的应用》为题,

Ph. Avouris以《用STM研究原子及纳米尺度上样品表面的原子操纵及电学性质》为题,分别阐述了各自领域中的新进展及其开创性研究工作。从这些报告中,我们可以感受到当前国际上扫描探针显微学的最新成就和发展趋势,这在随后进行的200多篇口头报告和200多篇墙报宣传中,即得到了全面而具体的体现。

金属和半导体这两个STM的传统领域,由于其极具潜力的应用前景,一直是人们关注的焦点,这在所提交的论文摘要的数量上(超过总数的25%)即可得到体现。一方面,诸如表面结构、表面重构、超晶格和电荷密度波等传统课题的研究仍在稳步发展;另一方面,由于超高真空(UHV)的普遍应用使得STM这种表面分析仪器的的工作环境大为改善。当纯净的金属及半导体表面的高分辨图象的获得变得容易而可靠之后,人们进而希望对表面吸附、表面反应及晶体生长的动力学过程进行研究。F. Besenbacher和阮理科等人在金属的表面反应、表面化学吸附的模型建立方面做了一些很有价值的工作。D. T. Pierce和J. A. Stroscio等人研究了多种金属在铁表面的形核及生长情况,其中通过铬在Fe(001)面上的生长情况的STM研究,在实空间里探讨了磁性层状材料的交换耦合关联作用。T. Hashizume等人通过对Ag(110)表面吸附氧的结构及振动方面的研究,提出了Ag-O-Ag线性附加列模型,他