

纳米隧道结的量子电容现象*

王兵[†] 鲁山 杨金龙 侯建国

(中国科学技术大学结构研究开放实验室 合肥 230026)

肖旭东

(香港科学技术大学物理系 香港)

摘要 利用 STM 针尖和二维 Au 纳米团簇构造的双隧道结,通过对单电子隧穿谱的测量,研究了纳米隧道结的电容随隧道结宽度的变化,发现电容随结宽度的变化偏离了经典电容的行为,为纳米隧道结的量子电容效应提供了实验证据.

关键词 量子电容, 纳米隧道结, 单电子隧穿效应

QUANTUM CAPACITANCE OF A NANOJUNCTION

WANG Bing LU Shan YANG Jin-Long HOU Jian-Guo

(Structure Research Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

XIAO Xu-Dong

(Department of Physics, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

Abstract The capacitance of a nanojunction formed by a scanning tunneling microscope (STM) tip and a two-dimensional gold cluster was measured through single electron tunneling spectroscopy of a double-barrier tunnel junction. By decreasing the STM tip-cluster separation, it was observed that the capacitance first increased and then decreased at short separation. This differs from classical behavior and provides evidence of quantum effects of the capacitance.

Key words quantum capacitance, nanojunction, single electron tunneling

随着半导体制造工艺的迅速发展,电子器件尺寸的线度以平均每 6 年减小一半的速度缩小.按照这一发展速度,在不久的将来,电子器件尺度将达到几十纳米,直至几纳米.在纳米尺度下,许多宏观的经典行为将不再成立,量子力学成为决定微观物理现象的主导机制.因此,对纳米尺度下新的量子现象和效应的研究成了国际上近年来的研究热点,其中对量子电阻和量子电容的研究引起了人们很大的研究兴趣.

1980 年, Klaus von Klitzing 等在对 GaAs - GaAlAs 异质结量子霍尔效应研究中发现了量子电阻 h/e^2 , 并于 1985 年获诺贝尔物理奖.经过 20 年的研究,人们对于量子电阻的概念,在理论和实验上都有较为透彻的理解.人们发现纳米尺度下的电输运现象和量子电阻相联系.如,在纳米结的电子隧穿过程中,要求隧道结电阻大于量子电阻 $h/e^{2[1]}$;最近 Butko

和 Adams 在对 Be 纳米薄膜的研究中观察到量子电阻附近的“量子金属”相^[2].与量子电阻现象相比,对于纳米尺度下电容的研究还不是很充分.虽然理论上认为电容的量子修正主要来源于纳米尺度电极的有限态密度、电子间相互作用的有限屏蔽深度以及电子隧穿效应等^[3],但是,至今还没有从实验上观察到电容的量子效应.实验中研究纳米体系电容的最大困难在于没有有效的办法使这个系统孤立,对其进行准确的电容测量.最近,我们在双隧道结中利用扫描隧道显微术 (STM/STS) 研究纳米隧道结的电容,观察到纳米隧道结的电容随电极间的距离(结宽度)

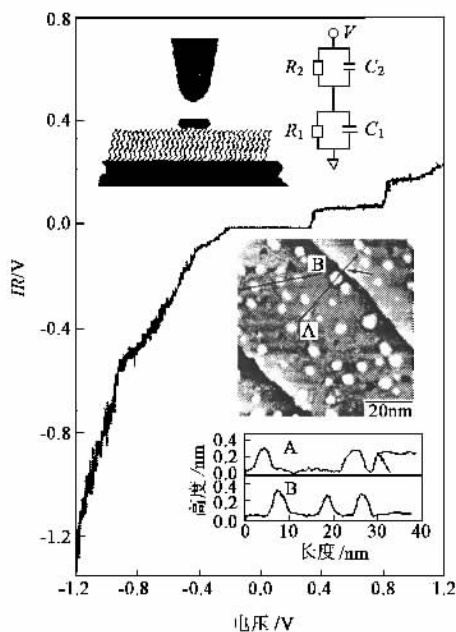
* 国家自然科学基金(批准号:59972036,10074059,19904012)资助项目

2001-09-03 收到初稿,2001-10-29 修回

[†] 通讯联系人, E-mail: bwang@ustc.edu.cn

变化关系明显地偏离了经典电容的行为^[4].

我们的实验是在如图 1 中的插图(上)所示一个纳米尺度的双隧道结体系上进行的,通过对单电子隧穿过程的电流-电压谱($I-V$)的测量研究了纳米结的电容.将二维的 Au 纳米团簇(直径约 3—5nm 的 Au 单原子层)生长在低介电常数硫醇有机膜/Au 表面,把 STM 的针尖垂直定位于一个 Au 团簇的上方. Au 纳米团簇与金衬底之间由硫醇单分子膜(其厚度约 1.4nm,相对介电常数 $\epsilon_r = 2.7$)绝缘隔开形成第一个隧道结,结参数 C_1, R_1 分别表示电容和电阻. STM 针尖与 Au 纳米团簇之间形成第二个隧道结,结参数为 C_2, R_2 ,这样就形成了双隧道结.对于给定的 Au 团簇,结参数 C_1 和 R_1 可看作常数,而 C_2 和 R_2 可以通过改变 STM 针尖与 Au 团簇的距离来改变.测量时首先要通过特定偏压下设定隧穿电流值来调节针尖与 Au 团簇间的距离,然后关掉反馈,测量双隧道结的电流-电压谱($I-V$).由于 $I-V$ 谱中库仑阻塞和库仑台阶的宽度决定于结参数 C_1, C_2, R_1 和 R_2 ,其中 C_1 和 C_2 中较大者主导 $I-V$ 谱库仑台阶的宽度,通过曲线拟合可以计算出电容 C_1 和 C_2 ^[5,6].



1 二维 Au 纳米团簇在双隧道结中典型的 $I-V$ 曲线显示了库仑阻塞和库仑台阶

(上插图图为双隧道结模型和等效电路,右下插图是二维 Au 团簇的 STM 图像,剖面图显示 Au 纳米团簇的高度约 0.25nm,即单原子层厚度)

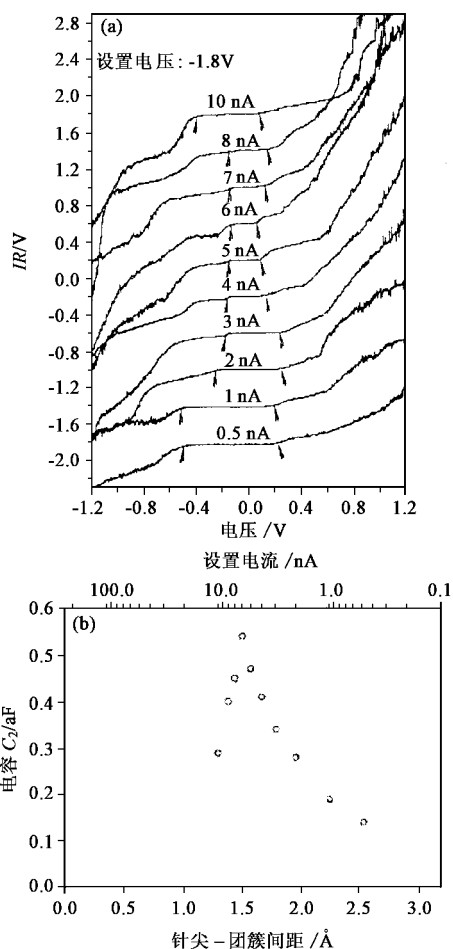


图 2

(a) 5K 下对 4nm 的 Au 团簇在不同的设置电流下测得的一系列 $I-V$ 曲线,为清晰起见,曲线在垂直方向上做了平移;
(b) 拟合的电容 C_2 与针尖-团簇间距 d 之间的关系

实验中,通过调节设定的电流改变针尖与 Au 团簇间距 d .如图 2(a)所示,当 STM 针尖与 Au 团簇距离较远时(设定电流 $I_s < 1\text{nA}$), $C_1 > C_2$,常数 C_1 决定了 $I-V$ 曲线中库仑台阶宽度没有明显变化;随 STM 针尖与 Au 团簇距离减小到临界值(设定电流 $I_s \geq 1\text{nA}$)后, $C_1 < C_2$, $I-V$ 曲线中的库仑台阶宽度由 C_2 决定,也就是说,此时 $I-V$ 曲线中的库仑台阶反映了第二个隧道结的电容参数 C_2 .通过拟合可以得到各 $I-V$ 曲线对应的电容 C_2 ;同时,注意到转折点的设定电流 $I_s \sim 1\text{nA}$ 时, $C_1 \sim C_2$,可以估算出不同设定电流下第二个隧道结相应的宽度 d .这样我们就得到了电容 C_2 随 d 的变化关系,如图 2(b)所示.随着 d 从约 2.5Å 减小到约 1.5Å,电容 C_2 增加; d 由 1.5Å 减小至 1.2Å 时,电容 C_2 减小了约 2 倍,这种现象显然是与经典电容不相符的.我们

对这一现象进行了细致的实验验证和理论分析.通过重复和可逆的实验过程说明所观察到的现象不是由于二维金团簇原子被破坏所造成的,通过分析估算,也排除了随 d 减小电容反常减小的现象是由强电场下非线性介电响应引起的可能性.

经过分析发现,这种非经典现象定性上是与理论预言的量子电容效应一致的^[3].在纳米尺度下,电容不能再用经典理论描述,而需要量子修正,此时电容的计算公式近似写为

$$C \approx \frac{R}{\frac{1}{C_0} + \frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_{II}}},$$

式中 C_0 是基于几何构型的经典电容, R 是电子在纳米隧道结中隧穿的反射几率,即 $R = 1 -$

$\exp(-d/l)$ 其中 l 是常数, $D_i (i = I, II)$ 是电极的散射局域态密度(LPDOS).从定性上讲,这一理论可以很好地解释我们的实验结果,在实验上证实了量子电容现象的存在.

参 考 文 献

[1] Hermann G, Michel H D ed. Single Charge Tunneling Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures. NATO Advanced Study Institute Series 294. New York Plenum Press. 1991
 [2] Butko V Y, Adams P W. Nature 2001 409 :161
 [3] Büttiker M. J. Phys. Condens. Matter 1993 5 9361
 [4] Hou J G, Yang J L *et al.* Phys. Rev. Lett. 2001 86 5321
 [5] Amman M, Wilkins R, Ben-Jacob E *et al.* Phys. Rev. B 1991 43 : 1146
 [6] Hanna A E, Tinkham M. Phys. Rev. B 1991 44 5919

· 前沿动态 ·

美国《科学》评出 2001 年十大科学成就

美国《科学》杂志评选出 2001 年十大科学成就：

1. 分子电子学获重大进展, 科学家们开发出了分子电路.
2. 对核糖核酸的研究证明, 它在人体中的功能是多种多样的, 例如, 核糖核酸在基因抑制和酶的活性中所起的作用就大大出乎科学家的意料.
3. 揭开了太阳喷发出的大量中微子丢失之谜. 这一发现对目前物理学的标准模型提出了质疑.
4. 人类基因组草图的公布. 目前, 有 60 多种生物体包括若干种致病微生物, 正成为科学家绘制基因组图的对象.
5. 开发出了新的超导材料.
6. 研究人员更多地了解了在发育的神经系统中, 分子

信号是如何吸引和排斥生长的神经轴突——神经神经网络之臂的.

7. 临床治疗上开始使用一种特定的“灵巧炮弹”式药物, 该药物可在人体内自动寻找并摧毁引起癌症的病变细胞.
8. 冷原子仍然是热门话题, 这表明凝聚态物质仍然受到极大的关注.
9. 国际气候变化小组今年正式宣称, 人类活动可能是 20 世纪全球变暖的原因.
10. 从大气和陆地上对美国碳沉积的观测是一致的, 观测表明, 碳沉积占美国产生的二氧化碳排放总量的 1/3.

美国《科学》预测 2002 年六大热门研究领域

去年年底出版的美国《科学》预测 2002 年的 6 大热门研究领域是：

1. 各国将加大干细胞研究力度. 尽管美国政府规定只支持限于 64 个人类胚胎干细胞系的研究, 但这项规定并不能限制私人资助的实验室和其他国家从事更多的干细胞研究, 因此, 一旦 2002 年各国政府制定了他们的研究法规后, 在世界范围内, 从老鼠到人胚胎干细胞的研究成果会层出不穷.
2. 揭开蛋白质组之谜. 虽然人体只有 3.5 万种基因, 但却可能包含有几百万种蛋白质. 目前, 一些生物技术公司和风险投资公司已投入上亿美元, 以揭开蛋白质组之谜. 预计 2002 年将会看到第 1 个以蛋白质为基础的“药靶”.
3. 加强天文学观测. 2002 年初, “双子座”计划中的第 2 台 8 米望远镜将在智利落成; 斯隆数字天空调查“计划将会

继续产生具体结果, 还将初步建成由大量天文数据库网络构成的“虚拟天文台”, 亦称“世界范围望远镜”. 它们在未来几年将会为天文学研究提供大量新发现.

4. 遗传学研究将有显著进展. 由于人类基因组草图已绘制完成, 在测定各种基因对诸如心脏病、癌症和糖尿病的相互作用方面, 研究人员可望有显著进展.
5. 光学钟的应用和自然常数的测定. 光学钟比以前的各种钟表要精确一个数量级. 它们将导致更精密的全球定位系统, 并将完成新一代试验, 以及对一些基本常数进行重新测试. 2002 年, 光学钟成为基本标准时, 这将导致一些研究工作步伐加快.
6. 更形象地对复杂系统进行观测. 明年, 电子低温显微术、电子显微镜层面照像术将会与计算机模拟技术相结合, 使对蛋白质彼此间相互作用的观测成为可能.