

# 纳米结构中的量子问题

解 思 深

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

**摘 要** 文章讨论了纳米器件发展方向和近期的研究成果,指出量子效应和纳米结构是将来的纳米器件的两大基础.以碳纳米管和各种电极组成的纳米结构为代表,论述了不同的量子效应及其在纳米器件中的可能应用.

**关键词** 纳米结构 纳米器件 碳纳米管 量子效应

## THE QUANTUM MECHANISM IN NANOSTRUCTURES

XIE Si-Shen

(Beijing Vacuum Physics Laboratory and Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** The development and recent investigations on nanodevices are discussed. It is pointed out that quantum effects and nanostructures form the basis of future nanodevices. Various nanostructures composed of carbon nanotubes and electrodes are used as examples to illustrate the different quantum effects and their potential applications in future nanodevices.

**Key words** nanostructures, nanodevices, carbon nanotubes, quantum effects

### 1 引言

信息技术、生命科学技术和纳米科学技术是 21 世纪的主流技术,其中纳米科技又是信息技术、生命科学技术持续发展的基础.纳米科技中最具有生命力的、最代表纳米科技发展前途的、对未来新技术和产业可能带来革命性冲击的是未来的纳米器件.尽管人们在近十几年来,从不同的角度或不同的学科出发,在实验室里得到了不同形式的纳米器件的原型.它们既演示出了各种量子效应,也显示出将来在纳米器件中的可能应用.但是,应该指出,仅靠目前的研究工作,对将来的、实用的纳米器件进行设计和构造还为时过早.将来的纳米器件应该是高集成的、多功能的和智能化的.它应该将信息的探测(传感器)、运算(芯片)、传输(通信)和动作的执行诸功能集为一纳米结构.因此,可以说研究纳米结构和用它们做成的纳米器件是纳米科技中最具有挑战性的领域之一.因为纳米结构中的电子波函数的运动受到限制和相互干涉,从而在输运、发光等方面表现出一些特殊现象,有助于对量子力学的一些基本问题进行理论上的澄清和实验检验.又因纳米结构在物理性质上具有独特的量子特点,可能成为下一代微电

子和光电子器件的基本单元,因此纳米结构中的量子力学问题就倍受人们关注.特别是在纳米结构中电子相互关联的性质、电子态的结构以及在输运过程中的散射问题,都已成为当前研究的重要课题.

### 2 各种纳米结构

就纳米结构而言,经过二十几年的研究,从不同的学科研究和应用的目的出发,用不同的材料和技术发展了各式各样的纳米结构.本文只能进行概括的描述.纳米结构大体上可分为以下几类:

(1)量子点及其列阵结构,包括半导体量子点列阵结构、金属量子点列阵结构、氧化物量子点列阵结构和超分子点阵结构等;

(2)一维量子线及组成的纳米结构,包括一维有机导体、金属量子线、半导体量子线、氧化物量子线和碳纳米管以及由它们组成的复合结构,如用金原子组成的类似螺旋管的结构,可使电子通过该螺旋管的速度大大提高(见图 1);

(3)超薄膜及其组成的多层膜结构或量子阱结构,包括半导体超晶格结构、金属多层膜结构或有机

\* 国家重点基础研究发展规划项目(批准号:G1999064502)

2001-02-06 收到

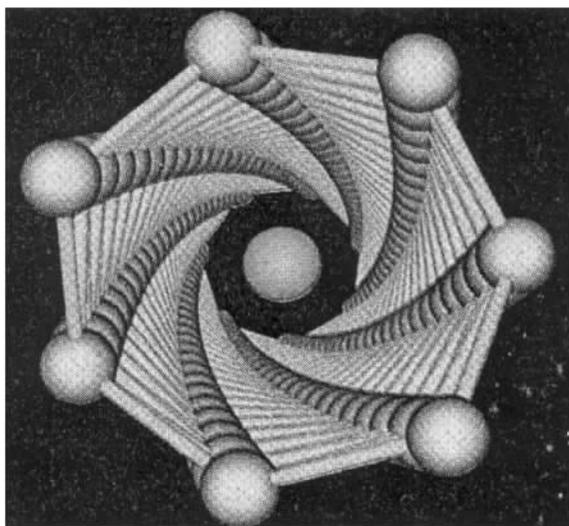


图1 由金原子组成的类似螺旋管的结构的示意图，(其中金原子排列成螺旋状)

膜结构等。

### 3 碳纳米管及电极组成的纳米结构

在众多的纳米结构中，单层碳纳米管是人工制备的、理想的、分子级的一维纳米材料或量子线。它的直径可从几纳米到小于 1nm 变化，而长度可达到几微米。按照单层碳纳米管的结构，它可分为椅型、齿型和螺型。碳纳米管中的电子波函数在管的轴向或有平移不变性，或存在平移和螺旋的不变性，而沿管的径向，电子被限制在单层碳纳米管的单原子层上运动，同时保持了在圆周上的圆对称性或螺旋对称性。碳纳米管直径很细和具有石墨的原子结构的特点使得它的理论问题被大大地简化。与其他已有的一维材料相比较，在碳纳米管中，不存在边界的散射，沿单层碳纳米管的圆周电子的波长是量子化的，也就是说，只有几个分离的电子波长或动量能满足周期性的要求。因此，尽管沿碳纳米管轴向电子的运动不受任何限制，但沿圆周方向的电子运动量子化使碳纳米管电子能带形成分裂的子带。子带之间的带隙宽度  $E_g$  大约为 1eV，远大于室温下的热运动能量 ( $k_B T = 0.025\text{eV}$ )。在单层碳纳米管的理论和实验研究中，很多的研究结果都指出，碳纳米管的电子能带中存在费米能量或费米面，而且只有两个一维的子带与费米能量相交。每一子带对应于一个量子点电导  $G_0 = 2e^2/h$ 。从而金属碳纳米管在低温下显示出典型的一维量子运输的特点， $I-V$  曲线上的每一台阶代表的本征电导为  $2G_0 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ S}$ ，这一数

值已被许多实验所证实，也可以用经典的近自由电子气体来解释(见图 2)。但在实验中也发现在很多情况下，要正确地解释实验结果必须考虑碳纳米管中电子间的相互作用(可参看 Tans S J *et al.* Nature, 1998 394 :761 ;Yu A *et al.* Science, 1999 ,284 :1508 ) (见图 3)

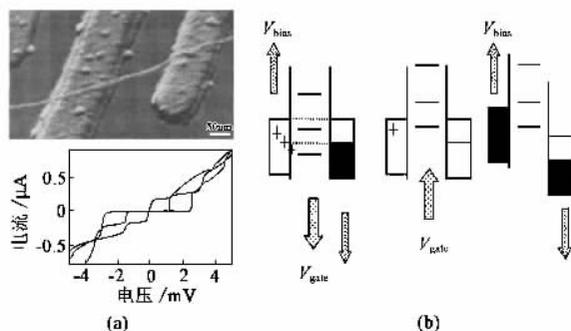


图2 (a)碳纳米管的量子运输实验 (b)解释碳纳米管的量子运输实验的能带模型

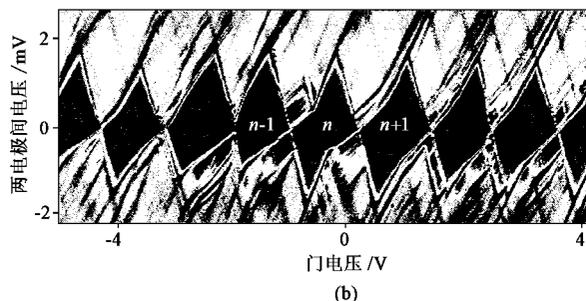
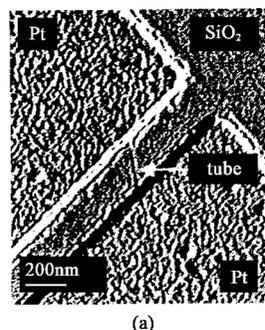


图3 (a)两 Pt 电极连接的碳纳米管，其衬底为  $\text{SiO}_2$ ；(b)两电极间电压  $V_{\text{bias}}$  与门底电压  $V_{\text{gate}}$  之间的关系

为了进一步说明碳纳米管中电子相互作用的性质，许多研究小组采用 STM 技术或微加工技术，研究了多层或单层的单根碳纳米管的运输问题，得出碳纳米管中电子波函数是退局域化的，它们的  $I-V$  曲线显示出典型的阶梯状。应该指出，在早期或 1998 年以前的研究工作中，由于在实验工作中多采用两电极的方法或 FET 形式，存在电极与碳纳米管

的接触问题或存在电子由碳纳米管向电极隧穿等问题,使得实验结果可用不同的理论解释.更加仔细的研究工作,特别是电子能量谱和碳纳米管电导随温度变化的规律研究,得出电子的运输是以碳纳米管和电极间的共振隧穿的方式进行的,进一步证实碳纳米管中的电子确实在管轴的方向具有扩展态,并存在一相干长度. Biekrath 与合作者( Berkeley )的碳纳米管电阻与温度之间存在幂指数的关系 ( $R \propto 1/T^\alpha$ ),似乎指出碳纳米管中的电子具有 Luttinger 液体的特点,但是这一现象同样也可以用量子点接触或多通道的运输模型来解释.况且,其他的研究小组观察到碳纳米管的电阻并不存在随温度的升高而下降的现象.可以说关于碳纳米管中电子的相互作用的性质,也就是说判断碳纳米管中的电子是费米液体还是 Luttinger 液体,至今尚没有定论.尽管如此,却导致了近期大量的研究工作.在改进实验技巧之后,人们集中研究了碳纳米管与不同材质的电极相连所产生的新现象,电子的电荷与自旋的关系以及局域掺杂对碳纳米管运输性质的影响等问题,以求进一步探索纳米结构中的基本量子力学问题.

#### 4 碳纳米管与超导电极组成的纳米结构

1999年,法国 Orsay 的南巴黎大学的 A. Yu. Kasumov 等人,在 1K 的温度下观察到直径 1nm 的单层碳纳米管或含有 100 根单层碳纳米管束中存在的邻近效应诱导的超电流或永久电流(图 4).用电弧放电法制备的单层碳纳米管与 Re/Au 或 Ta/Au 组成的双层电极之间的电阻很小.在一些接触电阻很小的样品中,他们观察到零电阻低温态和高的持久电流.

这一结果与 C. Kan 等人关于碳纳米管的隧穿电导性质与磁场关系的工作相矛盾. Kan 的工作指出碳纳米管中存在的磁有序态与超导是不相容的. Orsay 的科学家认为在碳纳米管中存在本征的超导涨落,在无限长的碳纳米管中一维特性使得超导转变不可能在有限的温度下实现.但这一超导态可能被电极的超导电性所稳定,而临界电流比 SNS 结的电流要高得多.这一设想也可解释他们观察到的正磁阻效应. SNS 结的电流与温度及磁场的关系显示出在碳纳米管中电子的强关联的反常性质.

#### 5 碳纳米管与铁磁性电极组成的纳米结构

1999年,日本科学家 K. Tsukagoshi 等研究了碳

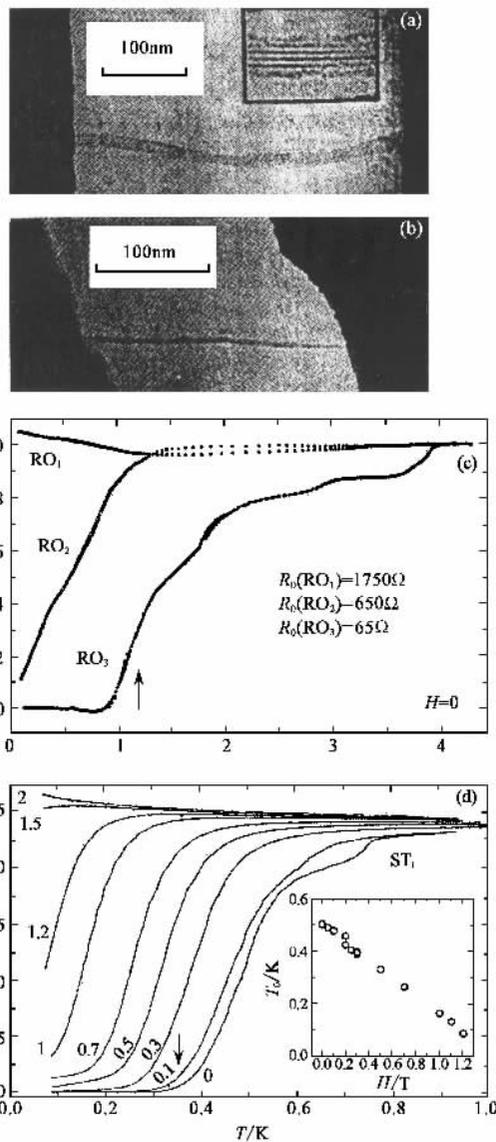


图 4 在 1K 温度下直径 1nm 的单层碳纳米管或含有 100 根单层碳纳米管束与超导电极的纳米结构中存在的邻近效应诱导的超电流或永久电流 [(a)和(b)为实验示意图 (c)和(d)分别为与(a)和(b)对应的实验曲线图]

纳米管中电子自旋的相干运输过程.在低温下,利用铁磁体( $Co$ )电极向多层碳纳米管(250nm 长,直径约为 10—40nm)内注入自旋极化电子,并在磁场  $\approx 50mT$  下观察到  $Co$ /碳纳米管结的磁电阻回线,其最大的电阻变化约为 9%(约 12k $\Omega$ ) (见图 5).从而得出碳纳米管中自旋反向的散射长度约为 130nm.这一结果与先前的碳纳米管中电子相位相干长度为 250nm 及弹性散射长度为 60nm 的实验结果相一致,得到了碳纳米管中电子自旋相干运输的直接证据.

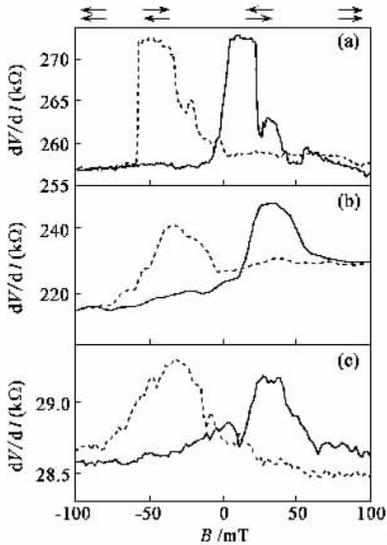
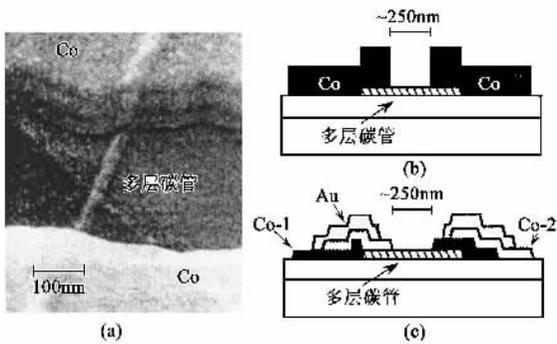


图5 碳纳米管与铁磁性电极组成的纳米结构显示了自旋极化的电子在磁场中运动时的磁阻变化 [(a)(b)(c)分别表示3个不同样品的实验结果]

## 6 碳纳米管与磁性量子点组成的纳米结构

2000年,哈佛大学的Lieber等人在单层碳纳米管上蒸发上0.5nm的Co簇,用低温(5K)STM研究了Co簇上及离Co簇7nm处的STS谱.扫描隧道显微镜的实验研究表明,在远离Co簇的中心位置,改变偏置电压时微分电导 $dI/dV$ 近似为一常数[见图(a)(b)].与碳纳米管的金属性相一致;而在Co簇的中心处,微分电导 $dI/dV$ 在接近0偏压时或费米能量附近,出现一强的共振峰.在离Co簇不同的位置测量STS谱,揭示了局域的磁微扰对费米能量附近共振峰的影响[见图(c)(d)],可以看到在离Co簇2nm处共振峰消失.这一衰减长度与Au表面或Cu表面上Co原子的磁微扰衰减长度相一致.理论

研究表明,Co簇可被当作具有离散的d能级的原子,其离散d能级与碳纳米管的导带共振.d能级宽化为碳纳米管费米面附近的d能带.在温度低于 $T_k$ 时,d能级的态被转移到碳纳米管的费米能级上,发生近藤(Kondo)共振.这一结果与一维强关联系统中的费米液体模型相一致.

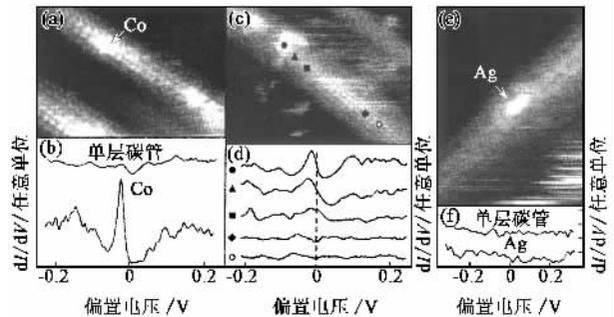


图6

(a)在碳纳米管上0.5nm Co簇的原子可分辨的STM图形(b)微分电导 $dI/dV-V$ 曲线,分别取自Co簇和离Co簇0.7nm处的裸露的碳纳米管,显示了近藤效应(c)在碳纳米管的碳原子图像背景上大Co簇( $<1\text{nm}$ )的恒电流STM图(d)取自Co簇上和离Co簇不同距离处的裸露的碳纳米管上的微分电导( $dI/dV$ )- $V$ 曲线(e)碳纳米管与带有Ag簇的STM图(f)微分电导( $dI/dV$ )- $V$ 曲线,分别取自Ag簇和离Ag簇2nm处的裸露的碳纳米管

## 7 结论

20世纪50年代,前苏联科学家朗道提出了费米液体理论在一维情况下受到了挑战.在一维相空间中,离散费米面导致电荷与自旋去耦合,从而必须用Luttinger液体理论来描述一维系统.但是上述的实验结果并没有得到这一结论.考虑到金属性碳纳米管中不存在派尔斯(Peierls)相变引起的金属向半导体的转变,人们不得不考虑碳纳米管的维度和建立更确切的理论框架.推广到其他类型的纳米结构中,也存在着同样的基础理论问题.尽管各种纳米结构及它们所显示的量子效应已成为当前研究的热点,并可能对将来的纳米器件的发展带来巨大的影响,但是在发展实用的纳米器件的过程中,必须要解决单个纳米器件的工作原理、工作材质和纳米加工技术问题,还必须解决纳米器件的集成技术以及和外部的连接技术.显然,纳米结构中基本量子效应的研究是它们的公共基础.