

\* 成果与应用 \*

# 超长定向碳纳米管列阵的制备 取得突破性进展

解思深\*

(物理研究所凝聚态物理中心 北京 100080)

关键词 碳纳米管, 进展

碳纳米管自 1991 年被发现以来, 由于其奇特的物理、化学特性和潜在的应用前景而日益受到人们的关注。碳纳米管是由多个碳原子六方点阵的同轴圆柱面套构而成的空心小管, 相邻的同轴圆柱面之间的间距与石墨的层间距相当, 约为 0.34nm。碳纳米管的直径约为几至几十纳米, 长度为几至几十微米, 且碳纳米管的直径和长度以及结构随不同的制备方法条件的变化而不同, 从而影响到碳纳米管的物理性质。对单层碳纳米管各种性质的理论研究表明, 这种纳米管的能带结构具有窄能隙的半导体性或近似为金属性。作为典型的一维量子输运材料, 用金属性碳纳米管制成的三极管在低温下表现出典型的库仑阻塞和量子电导效应。这就为碳纳米管在微电子技术中的应用开辟了道路, 如可用作扫描隧道显微镜或原子力显微镜的针尖, 特别是碳纳米管作为场发射源有望用于电子束刻蚀、电真空器件和平面显示器件。由于碳纳米管中碳-碳原子的间距短和单层碳纳米管的管径小(约 1nm), 使得结构中的缺陷不易存在, 从而单层碳纳米管的杨氏模量被估计为可高达 5 TPa。这是迄今可制备出的具有最高比强度和最大韧性的材料。人们估计碳纳米管作为复合材料中的加强材料的前景是十分乐观的。

目前, 人们可以用电弧放电法、激光蒸发法和有机气体催化热解法来大量制备碳纳米管。但从碳纳米管的基本性质研究和实际应用要求来看, 碳纳米管的制备技术仍存在三个方面的难题: 第一, 目前的样品多呈杂乱分布, 碳纳米管之间相互缠绕, 难以分散; 第二, 用电弧放电法制备的碳纳米管被烧结成束, 束中还存在很多非晶碳等杂质, 这样使得测量的各种物理和化学性质的结果比较分散, 在导电性质和力学性质方面的测量结果与理论估计值相差甚远; 第三, 目前制备的碳纳米管的长度只有几十微米, 只能用扫描隧道显微镜和原子力显微镜等非常规方法来测量其物理性能, 这给实验测量带来极大困难。因此, 制备出具有一定宏观长度的、离散分布的、高质量的碳纳米管, 成为人们追求的目标之一。

1998 年中国科学院物理研究所凝聚态物理中心的纳米材料与介观物理研究组在超长碳纳米管的大量制备方面取得了突破, 并相应地开展了碳纳米管的物性测量和研究工作。现将主

\* 物理研究所研究员  
收稿日期: 1999 年 7 月 13 日

要进展介绍如下:

(1)成功制备了超长定向碳纳米管阵列。

利用改进后的薄膜状  $\text{SiO}_2$  基底,不仅使碳纳米管的生长成为可控的,而且成功地实现了碳纳米管的顶部生长。结果表明:碳纳米管由基底表面垂直向上生长,从而形成高密度、离散分布的定向碳纳米管阵列。阵列中尽管有少量碳管在生长过程中发生轻微弯曲或缠绕,但大多数碳管沿其初始生长方向生长。碳管的外径均匀一致,石墨化程度较高,仅在管的外层附着少量的非晶碳。在新工艺条件下,大批量地制备出了长度为 2—3mm 的超长碳纳米管,比目前国际上现有的碳纳米管的长度提高了 1—2 个数量级。同时,制备出的碳纳米管直径均匀(约为 20nm),呈离散分布(管间距约为 100nm),取向性好,而且产量高。另一方面,利用该方法生长的碳纳米管阵列很容易从基底上取下,从而直接获得了高产量的、纯净的、底端自然开口的、定向碳纳米管阵列。这一工作得到 *Nature* 杂志编辑部的充分肯定。文章(Z. W. Pan, S. S. Xie, B. H. Chang, C. Y. Wang, L. Lu, W. Liu, W. Y. Zhou, W. Z. Li and L. X. Qian; Very long carbon nano-tubes; *Nature*, 394 (1998) 631)发表后受到高度评价,两次在国际学术会议上做大会邀请报告。英国金融时报(*UK Financial Times*)在 1998 年 8 月 13 日以“碳纳米管进入长的阶段”(Nano-tubes come in long version)为题介绍了这一工作。超长碳纳米管阵列的成功制备使得用常规实验方法对其进行测试成为可能,这对碳纳米管的基本性质研究和实际应用都有重要意义。

(2)在国际上首次用超长碳纳米管做出了拉伸实验的结果,直接测出了多层碳纳米管的杨氏模量和拉伸强度的实际数值。

超长碳纳米管的成功制备为采用常规实验手段测试碳纳米管的性能提供了条件。利用一种小型拉伸装置首次对碳纳米管的拉伸特性进行了研究,得到的碳纳米管的杨氏模量和抗拉强度分别为  $0.45 \pm 0.23 \text{ TPa}$  和  $1.72 \pm 0.64 \text{ GPa}$ 。与理论计算其相比,最近实验研究得到的结果力学性能偏低,主要原因是由于碳纳米管中存在的大量缺陷以及拉伸过程中石墨层之间的相对滑动。

(3)研究了超长碳纳米管的热学输运性质。

采用一种新的自加热  $3\omega$  方法测量了超长碳纳米管的热导率、比热和热扩散系数,发现碳纳米管的热导率比理论预计的要低许多,比理想石墨的热导率低约两个数量级;在实验温度范围内(10—300K),碳纳米管的比热在整个温区内随温度呈很好的线性关系。

(4)将碳纳米管成功地分散在溶液中,并用四波混频的方法测出了碳纳米管的三阶光学非线性系数  $\chi^3$ ,首次观测到碳纳米管的三阶光学非线性效应。