

碳纳米管室温单电子器件的构建和特性测量*

彭练矛^{1,2,†} 陈清¹ 梁学磊² 车仁超²夏洋³ 薛增泉¹ 吴全德¹

(1 北京大学电子学系 北京 100871)

(2 中国科学院物理研究所电子显微镜实验室 北京 100080)

(3 中国科学院微电子中心 北京 100029)

摘要 利用传统微加工与纳米组装技术构建出了金属颗粒调制的复合碳纳米管场效应及单电子器件. 电子输运性能测量结果表明这类复合碳纳米管电子器件具有一些不同于一般碳纳米单电子器件的独特性能, 特别是在室温下实现单电子特性.

关键词 纳米电子学, 纳米电子器件, 单电子器件, 纳米科技

FABRICATION AND CHARACTERISTICS OF METAL PARTICLE MODULATED CARBON NANOTUBE SINGLE ELECTRON TRANSISTORS

PENG Lian-Mao^{1,2,†} CHEN Qing¹ LIANG Xue-Lei² CHE Ren-Chao²XIA Yang³ XUE Zeng-Quan¹ WU Quan-De¹

(1 Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

(2 Beijing Laboratory of Electron Microscopy, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(3 Center of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract Metal particle modulated carbon nanotube devices have been fabricated using conventional lithography and nanotechnology. Their field-effect and single electron characteristics have been measured for various temperatures.

Key words nanoelectronics, nanoelectronic devices, single electron devices, nanotechnology

碳纳米管具有极其优异的导电、导热以及力学特性, 是构建纳米电子学器件的理想材料^[1]. 近年基于碳纳米管的纳米电子学器件研究取得了突破性的进展. 纳米碳管场效应晶体管^[2]和纳米碳管单电子晶体管^[3]先后问世. 2001年间荷兰 Delft 大学 Dekker 研究组更是制备出了纳米碳管室温单电子器件^[4]和基于纳米碳管场效应晶体管的逻辑单元器件和振荡器^[5], 将纳米电子学向实用化的发展大大地推进了一步.

纳米单电子器件的研究是纳米电子学器件研究的一个重要的方面. 单电子器件具有耗能小, 无散热问题等优点, 主要问题之一是一般只能在低温下工作. 一个最简单的孤立的单电子器件就是一个孤立的量子或“库仑岛”^[6], 其工作温度可通过其库仑充电能 $E_C = e^2/2C$ 来估算, 要求 $E_C \gg k_B T$ (T 为工作温度). 其中最关键的参数是单电子器件的有效电容

C , 有效电容 C 越小其充电能 E_C 越高, 工作温度也就越高. 构建高工作温度单电子器件的关键在于减小其有效电容. 在一定的制约条件下, 减小器件尺度是最为有效和常用的提高其工作温度的方法.

一根长度为 L 的纳米碳管的电容可近似地通过下式来估算^[7]

$$C \approx 2\pi\epsilon_0 L / \ln(2L/d),$$

其中 d 为纳米管的直径. 对于一根 $1\mu\text{m}$ 长, 直径为 1.4nm 的碳管, E_C 约为 10meV . 为了观察到室温单电子效应, 我们需有 $E_C \gg 23\text{meV}$, 要求作为“库仑岛”的有效纳米碳管的长度不超过几十纳米. 在一般

* 北京大学“九五”计划、国家科技部“九七三”计划(批准号: 001CB610502)和中国科学院创新工程资助项目

2002-10-08 收到初稿, 2002-11-11 修回

† 通讯联系人. E-mail: lmpeng@blem.ac.cn

的实验条件下这个条件是很难满足的.

在 Dekker 等人的实验中^[4],作为“库仑岛”的有效纳米碳管是制约在两个位垒中的一小段碳管.位垒是通过在一根较长(微米数量级)的碳管上通过原子力显微镜人为地引入 2 个缺陷来实现的.缺陷导致局域位垒的形成,在 2 个缺陷间形成了一段孤立的有效长度约为 25nm 的碳纳米管线段.在室温情况下整个纳米碳管晶体管的单电子效应主要是由这段有效电容最小的纳米管产生的,即这段 25nm 长的碳管就是有效的库仑岛.

虽然 Dekker 等人通过这种方法构建成功了室温下工作的单电子纳米碳管器件,从实际应用角度来讲这种方法是不现实的.在我们的实验中我们通过在纳米碳管生长过程中引入原子团簇到纳米碳管内部,这些原子团簇和碳管相互作用形成局域位垒,每两个局域位垒之间的碳管都可视为孤立的库仑岛.原子团簇的间距因而基本决定了有效的库仑岛的尺寸.在我们的实验中纳米碳管是采用化学气相沉积(CVD)的方法来制备的.在碳管生长过程中通过定时提供过量的金属元素(在我们的实验中是铁元素)可以定时可控地向碳管填充原子团簇.在一定程度上我们在生长过程中控制了碳管中原子团簇的间距,原则上讲也就是控制了单电子器件的工作温度.

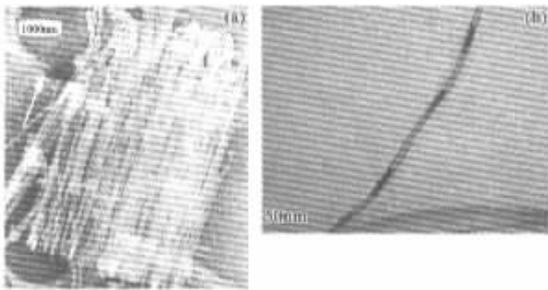


图 1 通过多步热分解 CVD 方法制备的多壁碳纳米管的透射电子显微镜照片
(a) 低倍 (b) 高分辨

图 1(a)所示为通过 CVD 方法在硅衬底上制备的多壁碳纳米管膜的透射电镜照片.这些结果以及详细的成分分析表明铁原子团簇已被填充到了纳米碳管的内部,而且这些铁原子团簇对碳管的外部形貌产生了相当大的影响.可能的影响是通过两个途径所造成的.首先值得强调的是铁原子团簇进入碳管和碳管的生长基本是同时发生的.铁原子团簇可以直接影响碳管的生长.另一个值得注意的事实是铁和碳的热膨胀系数是不一样的.高分辨电镜结果

分析表明一些铁金属团簇或颗粒是紧贴着碳纳米管壁生长的.由于不同的热膨胀系数,变化温度铁金属颗粒不可避免地要对外部的碳管壁产生应力.当应力足够大时可以将局部的碳管从金属性的转变为绝缘性的,在金属颗粒之间形成一系列串联着的孤立库仑岛.

本研究用的纳米碳管晶体管是通过在如图 2 所示的微电极上组装碳纳米管来制备的.微电极是采用传统的微加工技术制备的.首先在掺杂的半导体 Si 基底上生长一层厚度约为 200nm 的 SiO_2 绝缘层.在这个绝缘层上再采用光刻方式制备出约 60nm 厚的 TiN/AlSi 电极结构.图 2 中衬底较暗的区域为 TiN/AlSi 电极,衬度较亮的区域为裸露在外面的 SiO_2 绝缘层.图的下部所显示的亮度为纳米碳管,碳管的两端为通过聚焦离子束工作站(FIB).图 2 所示的电极加纳米碳管结构实际上也就是一个最简单的纳米碳管场效应晶体管.图左边的电极可以作为三极管的源,图右边的电极可以作为漏.纳米碳管作为导电通道源漏电极间的导电通道. SiO_2 绝缘层下面的 Si 基底作门级,用以调节纳米碳管中的电流.

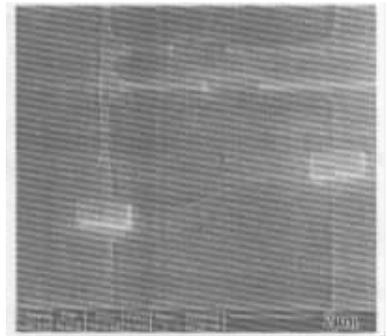


图 2 纳米碳管晶体管的平面扫描电镜照片

对于图 2 所示的纳米碳管场效应晶体管的电学特性测量表明纳米碳管可以表现出明显不同的两类电学特性.一类碳管的源漏间的电流随源漏电压的变化或 $I-V$ 曲线基本显线性关系,且基本不随门电压变化.这种电学特征表明相应的主要导电管壁是金属型的.另一类碳管显现明显的电压随电流的非线性关系,而且其源漏电流明显地受到了门电压的调制.这种电压电流特性表明相应的主要的导电碳纳米管壁是半导体型的,基本特征与传统的场效应晶体管基本相同.细致的测量表明在弱场条件下多壁碳纳米管主要是通过最外层的一层管壁来传输电流的,并非所有管壁都参与导电过程.导电的管壁可以是金属性的也可以是半导体性的.通过加载较

大的偏压,我们可以可控地烧掉最外层的有效的导电管壁,用同一根纳米碳管实现从金属性至半导体性或半导体性至金属性的转变.

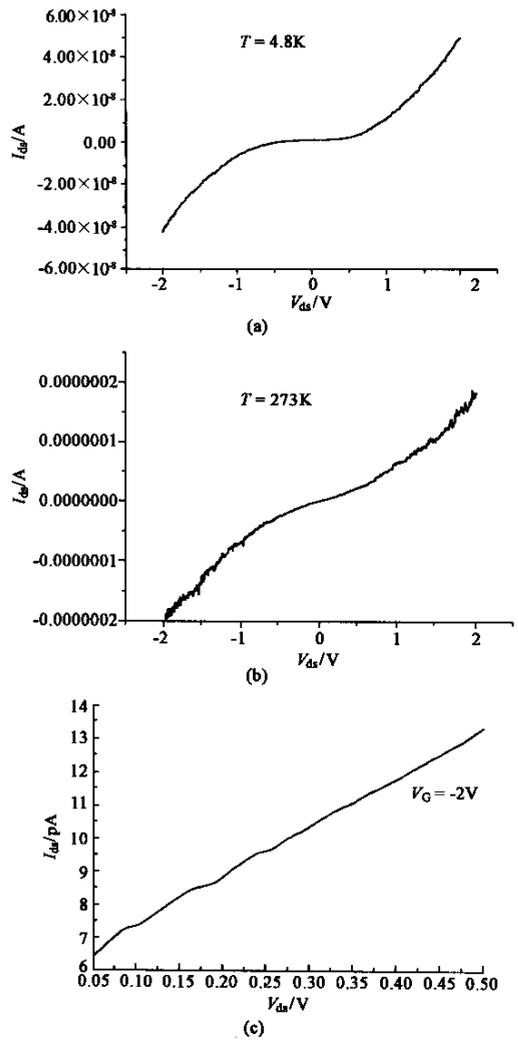


图 3 对一根典型纳米碳管在 (a) $T = 4.8\text{K}$ 和 (b) 室温 $T = 273\text{K}$ 下测量所得电压 - 电流特性曲线,图 (c) 所示为另一根纳米碳管在室温测量所得电压 - 电流特性曲线

图 3 (a) 所示为对一根典型的金属型的纳米碳管在低温 4.8K 时测量所得的 $I - V$ 曲线. 这条 $I - V$ 曲线在零偏压附近显现出了一个非常清晰的单电子平台. 这个台阶的产生是由于被限制在一个孤立的量子或“库仑岛”中的电子对外来的电子有很强的静电库仑排斥力. 在较小的源漏偏压下外来的电子由于这个库仑排斥力不能进入“库仑岛”,导致在一

定的偏压范围内电流不随电压变化,即在 $I - V$ 曲线中出现一个平台. 一般来讲这个平台的宽度是和文章前面所讲的库仑充电能 E_C 成正比的,即只有当从源电极出来的电子在偏压下获得足够大的能量时才能克服“库仑岛”中电子的排斥力进入并通过“库仑岛”产生电流. 随着温度升高,由于随机的热激发,外来电子可能在很小的偏压下也有一定的几率进入并通过“库仑岛”,使得单电子平台逐渐变小. 一般来讲温度越高单电子效应越不容易被观察到,室温单电子器件很难实现. 然而图 3 (b) 清楚地表明直至室温单电子平台仍未完全消失. 图 3 (c) 所示为对另一根纳米碳管测量所得的更为复杂的 $I - V$ 曲线,若干间距不等的平台隐约可见. 相应的电导曲线更清晰地表明存在有若干个电导峰. 由于我们的纳米碳管晶体管的源漏电极间的有效碳管长度一般为一个微米以上,一般情况下在室温是不应该观察到单电子效应的. 但如我们前面所讲,真正起决定作用的有效单电子库仑岛实际上是位于两个原子团簇间的一段碳管. 如图 1 (b) 所示,在我们的纳米碳管中填充进了一系列的金属铁颗粒. 有效的导电通道可以等效为一系列尺寸大小不等的串联的库仑岛. 整个纳米碳管单电子器件的最高工作温度是由充电能最高或有效尺度最小的库仑岛所决定. 我们的透射电镜结果表明不少碳管都存在有很靠近的原子团簇,室温单电子效应是完全有可能的. 图 3 (c) 表明在相应的纳米碳管中存在不止一个工作温度高于室温的单电子库仑岛. 由于在生长过程中我们可以调节碳管中的原子团簇间距,预计通过进一步减小原子团簇间距可以制备出工作温度更高的纳米碳管单电子晶体管.

参 考 文 献

- [1] Dekker C. *Physics Today*, 1999, 52: 22
- [2] Martel R *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 73: 2447; Tans S *et al.* *Nature*, 1998, 393: 49
- [3] Bockrath M *et al.* *Science*, 1997, 275: 1922; Tans S *et al.* *Nature*, 1998, 394: 761
- [4] Postma H W, Teepen T, Yao Z *et al.* *Nature*, 2001, 293: 76
- [5] Derycke V *et al.* *Nano. Letters*, 2001, 1: 453; Bachtold A *et al.* *Science*, 2001, 294: 1317
- [6] Likharev K. *Proc. IEEE*, 1999, 80: 606
- [7] Bezryadin A, Verschueren A R M, Tans S T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 80: 4036