

# 基于碳纳米管场效应管构建的纳电子逻辑电路<sup>\*</sup>

李萍剑 张文静 张琦锋 吴锦雷<sup>†</sup>

(北京大学电子学系,北京 100871)

(2006 年 6 月 5 日收到,2006 年 7 月 19 日收到修改稿)

展示了由碳纳米管场效应管构成的三种逻辑电路,分别为单个 p 型碳纳米管场效应管的开关电路、由集成在同一硅片上的单个 p 型碳纳米管场效应管和单个 n 型掺氮碳纳米管场效应管构成的互补型反相器,以及两个独立的 p 型碳纳米管场效应管构成的或非门. 其中 p 型碳纳米管场效应管以单壁碳纳米管作为沟道,而 n 型碳纳米管场效应管则以掺氮的多壁碳纳米管作为沟道,器件的源漏电极均为铂电极.

关键词:碳纳米管,场效应管,逻辑电路

PACC:7125X

## 1. 引 言

在硅基微电子学发展的过程中,器件的特征尺寸随着集成度的越来越高而日益减小,按照摩尔定律 2010 年以后器件的典型尺寸将小于 30 nm. 在此尺寸下器件将不再遵从传统的运行规律,具有显著的量子效应和统计涨落特性. 为了解决这些问题,人们进行了不懈地努力,研究基于碳纳米管的纳电子器件就是其中很有前途的一种方法.

自从 Iijima 在 1991 年发现碳纳米管后<sup>[1]</sup>,碳纳米管以其奇异的物理和化学性质吸引了众多科学家的目光<sup>[2-8]</sup>. 碳纳米管巨大的长径比使得它可以被看作是理想的一维材料,电子的输运被限制在长度方向. 根据螺旋度的不同,碳纳米管可分别呈现出金属性和半导体性. 1998 年, Dekker 小组<sup>[9]</sup>利用半导体型的单壁碳纳米管得到了第一个在室温下工作的场效应管. 随后, Dekker, Avouris 和 Dai 等小组<sup>[10-15]</sup>从理论和实验上对碳管场效应管进行了深入的研究,并在此基础上利用碳纳米管场效应管构成了一些简单的逻辑电路.

目前国际上基于碳纳米管构建的场效应管仍然处于实验室研究阶段,为了我国获得自主知识产权,积极开展这方面的研究具有重要的意义. 在以前的

工作中<sup>[5]</sup>我们研究了接触电极的功函数对碳纳米管场效应管性能的影响,发现可以通过改变接触电极的材料,实现 p 型碳纳米管场效应管和 n 型碳纳米管场效应管之间的转换. 本文在此基础上进行了深入的研究并构建了简单的纳电子逻辑电路,首先分别采用单壁碳纳米管和掺氮的多壁碳纳米管作为沟道构建了 p 型输运特性和 n 型输运特性的场效应管,随后利用这些碳纳米管场效应管得到了三种简单的逻辑电路,分别是单个 p 型碳纳米管场效应管的开关电路,由集成在同一个硅片上的单个 p 型碳纳米管场效应管和单个 n 型掺氮碳纳米管场效应管组成的互补型反相器,以及两个独立的 p 型碳纳米管场效应管构成的或非门.

## 2. 实 验

在实验中使用的单壁碳纳米管由化学气相沉积法制备获得,硝酸铁作为催化剂,氧化镁作为载体,甲烷在 1123 K 的温度下催化裂解 30 min,保护气体为氩气,合成的单壁碳纳米管经过提纯处理后溶解在 1,2-二氯乙烷中,掺氮的多壁碳纳米管通过以二茂铁与三聚氰胺的混合物为前驱体,在 1123 K 的温度下催化裂解获得,保护气体为氩气,合成后的掺氮碳纳米管分散在异丙醇溶液中,为下一步构建碳纳

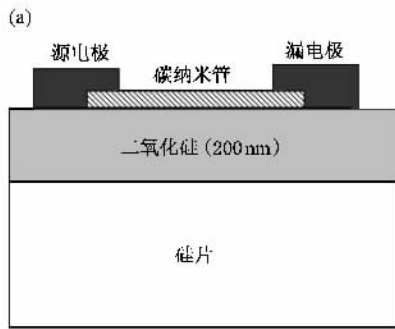
<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展规划(批准号:2001CB610503),国家自然科学基金(批准号:90206048,90406014,90406024,60471007)和北京市自然科学基金(批准号:4042017)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: jlwu@pku.edu.cn

米管场效应管做好准备。

### 2.1. 基于单壁碳纳米管的 p 型场效应管的构建

图 1 是利用 Pt 作为源漏电极材料,单壁碳纳米管作为输运沟道的场效应管的结构示意图(a)和扫描电子显微镜图(b)。重掺杂的硅片作为基底,其上热生长一层 200 nm 厚的二氧化硅作为绝缘层,Si



作为门电极,然后采用光刻技术在  $\text{SiO}_2$  上制备 Au 电极图案(作为源漏电极的引出)。单壁碳纳米管经由 1,2-二氯乙烷分散在  $\text{SiO}_2$  表面,随后利用离子束技术沉积一层厚 50 nm 的 Pt,一端连接单壁碳纳米管,另一端则连接作为引出用的 Au 电极。我们测量了沟道在 500 nm—3  $\mu\text{m}$  的多个样品,得到了相似的电学特性测量结果。

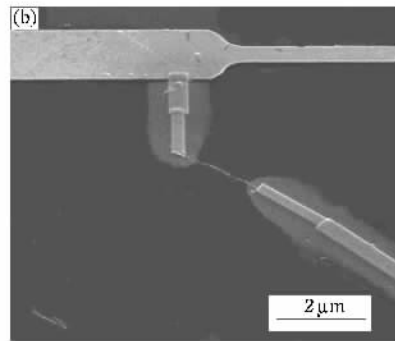


图 1 基于碳纳米管构建的 p 型场效应管的结构示意图(a),50 nm 厚的 Pt 沉积在碳纳米管上作为源漏电极,重掺杂的硅片作为门电极引出,硅片上热生长的 200 nm 厚度的  $\text{SiO}_2$  层作为绝缘层;(b)扫描电子显微镜图,沉积的铂电极间的距离约为 2  $\mu\text{m}$

在制备场效应管的过程中,利用扫描电子显微镜来表征单壁碳纳米管在  $\text{SiO}_2$  上的分散,以选择合适的单壁碳纳米管来作为场效应管的沟道。由于扫描电子显微镜的分辨率限制,难以观察到单根单壁碳纳米管,使得在选择构建场效应管的单壁碳纳米管时无法利用单根的碳纳米管,只能选取由多根单壁碳纳米管的管束作为场效应管的输运沟道。在本中,测量的单壁碳纳米管束的直径大多在 10 nm 左右。

### 2.2. 基于掺氮多壁碳纳米管的 n 型场效应管的构建

掺氮碳纳米管场效应管的结构与 p 型碳纳米管场效应管的结构相似,如图 1(a)所示。重掺杂的硅片作为基底,其上热生长一层厚 200 nm 的二氧化硅作为基底,其中  $\text{SiO}_2$  作为绝缘层,Si 作为门电极,然后采用光刻技术在  $\text{SiO}_2$  上制备 Au 电极图案(作为源漏电极的引出,图 2 中的圆形的图案为定位标记)。掺氮多壁碳纳米管经由异丙醇溶液分散在  $\text{SiO}_2$  表面,随后利用离子束技术沉积一层厚 50 nm 的 Pt 作为源漏电极,一端连接单壁碳纳米管,另一端则连接作为引出用的 Au 电极,图 2 是器件结构的扫描电子显微镜图。我们测量了沟道在 2—5  $\mu\text{m}$  的

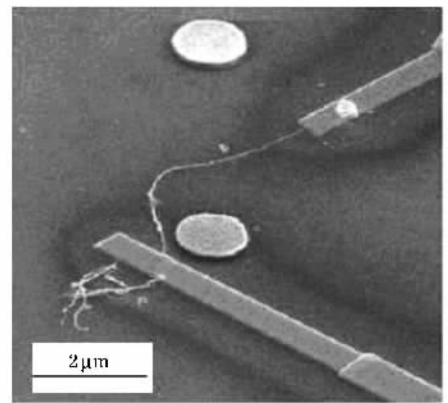


图 2 n 型掺氮多壁碳管场效应管的扫描电子显微镜图

多个样品,得到了相似的电学特性测量结果。

## 3. 结果和讨论

图 3 是采用单壁碳纳米管作为沟道构建的场效应管的电流输出特性曲线,从图中可以发现碳纳米管场效应管的开启电压  $V_{t1} = -0.5 \text{ V}$ ,跨导  $g_m = 4 \mu\text{A/V}$ 。器件在负的门电压下开启,随着门电压的减小,源漏电流  $I_{ds}$  相应的增大;而在正的门电压下则进入截止区,电流则随着门电压的增大而相应减小,整个器件在门电压的调制下呈现出典型的 p 型

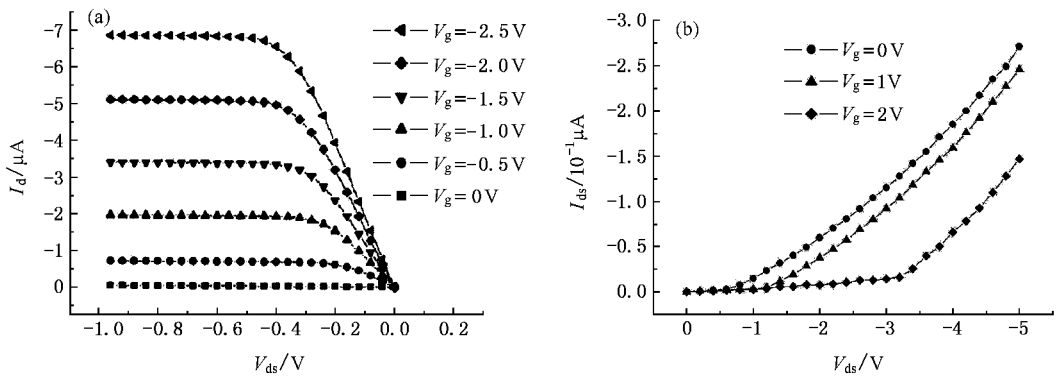


图 3 基于单壁碳纳米管构建的 p 型场效应管的电流  $I_{ds}$  输出特性曲线 源漏电极材料采用 Pt,  $\text{SiO}_2$  厚 200 nm (a) 门电压  $V_g$  的扫描范围从 0 V 到 -2.5 V, 源漏电压  $V_{ds}$  的扫描范围从 0 V 到 -1 V, 开启阈值电压  $V_t = -0.5$  V, 跨导  $g_m = 4 \mu\text{A}/\text{V}$ , (b) 门电压  $V_g$  的扫描范围从 0 V 到 2 V, 源漏电压  $V_{ds}$  的扫描范围从 0 V 到 -5 V

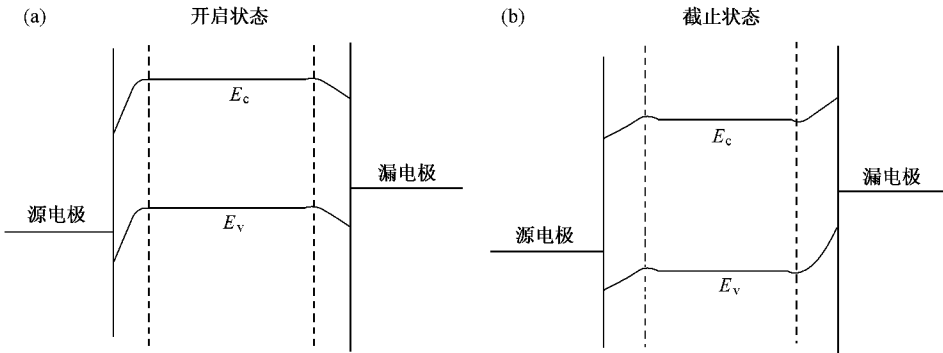


图 4 负向漏源偏压下 p 型碳纳米管场效应管的能带结构图  $E_c$  是导带底,  $E_v$  是价带顶 (a) 开启状态, 门电压小于开启电压 (b) 截止状态, 门电压大于开启电压

运输特性,说明在这种结构的碳纳米管场效应管 输运载体子主要是空穴. 目前基于半导体型碳纳米管构建的场效应管的工作原理通常被解释为肖特基势垒的调制<sup>[10-12]</sup>,即通过门电压调制金属电极与半导体型碳纳米管在接触界面产生的肖特基势垒的高度,从而控制源漏之间的电流大小. p 型碳管场效应管的运输特性可以用图 4 中的能带结构来很好地解释.

我们将图 4 中的能带结构用虚线分为三个部分,中间的部分代表碳纳米管本身的能带结构,两边的部分分别代表源极和漏极与碳纳米管的接触情况. 从图 4(a)中可以看到,在场效应管开启的状态下,空穴通过肖特基势垒从源电极隧穿到碳纳米管. 当固定源漏电压时,碳纳米管的能带随着门电压的减小而上移,导致源电极与碳纳米管接触产生的肖特基势垒的宽度减小,增大了空穴从源电极到碳纳米管的隧穿几率,从而源漏电流的大小随之增加,图

4(b)是 p 型碳纳米管场效应管截止状态下的能带结构示意图,空穴被源电极与碳纳米管接触产生的肖特基势垒阻挡,在固定源漏电压的情况下,碳纳米管的能带随着门电压的增大而上移,导致源电极与碳纳米管接触产生的肖特基势垒的宽度增加,从而进一步减小了源漏之间电流的大小. 因此在 p 型碳管场效应管的运输机理里面,源漏电极与碳管接触产生的肖特基势垒起到了关键的作用,可以通过门电压和源漏电压对肖特基势垒的调制,来控制源漏之间的电流大小.

图 5 是基于掺氮多壁碳纳米管构建的场效应管的电流输出特性曲线,从图中可以发现碳纳米管场效应管的开启电压  $V_t = 0.5$  V,跨导  $g_m = 2.4 \mu\text{A}/\text{V}$ . 器件在正的门电压下开启,随着门电压的增加,源漏电流相应的增大,而在负的门电压下则进入截止区,电流随着门电压的增大而相应减小,整个器件在门电压的调制下呈现出典型的 n 型输运特性,说明在

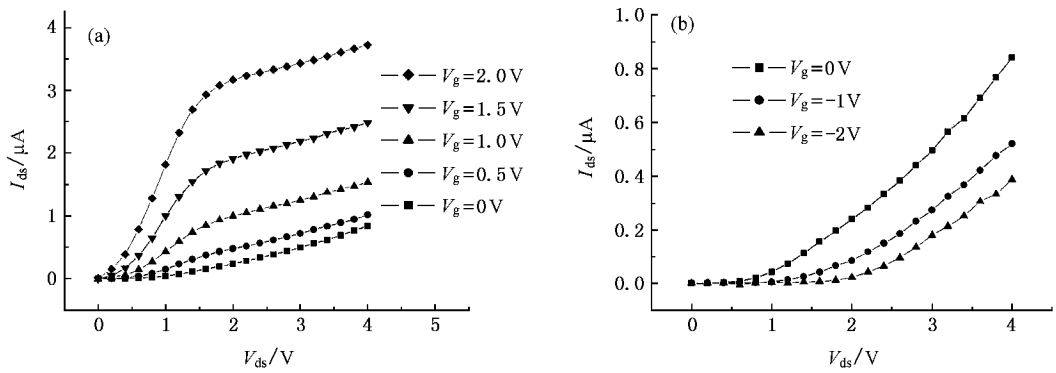


图5 基于掺氮多壁碳纳米管构建的n型场效应管的电流 $I_{ds}$ 输出特性曲线 源漏电极材料采用Pt, SiO<sub>2</sub>厚200 nm作为绝缘层 (a)门电压的扫描范围从0 V到2 V,源漏电压的扫描范围从0 V到4 V,开启阈值电压 $V_{t1} = 0.5$  V,跨导 $g_m = 2.4 \mu\text{A}/\text{V}$  (b)门电压的扫描范围从0 V到-2 V,源漏电压的扫描范围从0 V到4 V

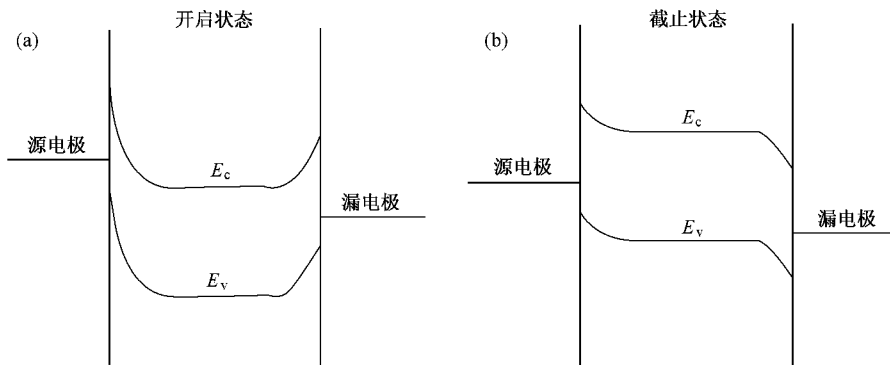


图6 正向漏源偏压下p型碳纳米管场效应管的能带结构图 (a)开启状态,门电压大于开启电压 (b)截止状态,门电压小于开启电压

这种结构的碳纳米管场效应管中,输运载流子主要是电子.这表明掺杂的氮原子具有很强的给电子能力,强烈地修正了多壁碳纳米管的能带结构,使得掺氮碳纳米管呈现出典型的n型半导体特性.

掺氮碳纳米管场效应管的输运机理同样可以应用肖特基势垒调制的模型来加以解释,由于Pt的功函数为5.2 eV大于掺氮多壁碳纳米管的功函数,所以电极和掺氮碳纳米管接触界面的能带向上弯曲,形成肖特基势垒,当门电压为正电压时,碳纳米管的能带下移,减小了源电极与掺氮碳纳米管接触界面肖特基势垒的宽度,从而增大了电子从电极到碳纳米管的隧穿几率,因此器件处于开启状态;反之当门电压为负电压时,碳纳米管的能带上移,增大了源电极与掺氮碳纳米管接触界面肖特基势垒的宽度,导致电子从电极到碳纳米管的隧穿几率减小,从而器件进入截止状态,具体的能带结构如图6所示.

同时在测量的结果中可以发现基于掺氮多壁碳

纳米管构建的n型场效应管的截止电流较大,这可能是由于Pt的功函数远高于掺氮碳纳米管(相对碳纳米管的禁带宽度),导致接触界面的能带弯曲较大,从而使得Pt的费米能级靠近掺氮碳纳米管的价带能级,所以当门电压为负时,碳纳米管能带的上移虽然减小了电子从源电极到掺氮碳纳米管的隧穿几率,但同时也增大了作为少子的空穴从漏电极到掺氮碳纳米管的隧穿,这显然不利于掺氮碳纳米管场效应管的应用,如何改进结构减小器件的截止电流需要进一步地研究.

以上我们分别采用单壁碳纳米管和掺氮多壁碳纳米管作为沟道,获得了p型和n型的碳纳米管场效应管.在此基础上我们利用碳纳米管场效应管得到了一些简单的逻辑电路,见下文.

### 3.1. 单个p型碳纳米管场效应管的开关电路

图7(a)是单个p型碳纳米管场效应管的开关

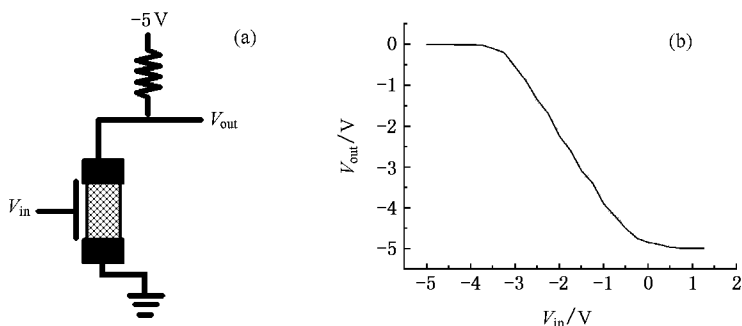


图7 p型碳纳米管场效应管开关电路的(a)电路示意图(b)电压传输特性曲线

电路,电源电压为 $-5\text{ V}$ ,偏置电阻为 $0.5\text{ M}\Omega$ ,取低电平为 $-5\text{ V}$ (逻辑1),高电平为 $0\text{ V}$ (逻辑0),p型场效应管由Pt作为源漏电极,单壁碳纳米管作为沟道,结构示意图和扫描电子显微镜图见图1。当输入电压 $V_{in} = -5\text{ V}$ (逻辑1)时,碳纳米管场效应管处于开启状态,器件的电阻远小于偏置电阻,因此电源电压降在偏置电阻上,输出电压为 $0\text{ V}$ (逻辑0);当输入电压 $V_{in} = 0\text{ V}$ (逻辑0)时,场效应管处于截止状态,此时电源电压降在场效应管两端,输出电压为 $-5\text{ V}$ (逻辑1),碳纳米管场效应管开关电路的电压传输特性曲线如图7(b)所示。

### 3.2. 互补碳纳米管场效应管反相器

图8(a)是互补型碳纳米管场效应管反相器的电路示意图,由一个p型碳纳米管场效应管和一个n型碳纳米管场效应管组成,电源电压为 $-2\text{ V}$ ,p型碳纳米管场效应管的结构和扫描电子显微镜图见图1,n型掺氮碳纳米管场效应管以Pt作为源漏电极,掺氮碳纳米管作为沟道,具体构建见图2,这两个碳

纳米管场效应管在同一个硅片上得到。当输入电压 $V_{in} = -5\text{ V}$ 时,p型碳纳米管场效应管开启,n型碳纳米管场效应管截止,输出电压为 $0\text{ V}$ ;当输入电压 $V_{in} = 0\text{ V}$ 时,n型碳纳米管场效应管开启,p型碳纳米管场效应管截止,因而输出电压为 $-2\text{ V}$ ,图8(b)是实际测量的电压传输特性曲线。

### 3.3. 或非门(NOR)

图9(a)是碳纳米管场效应管或非门的电路示意图,由两个p型碳纳米管场效应管组成,电源电压为 $-5\text{ V}$ ,偏置电阻为 $0.25\text{ M}\Omega$ ,取低电平为 $-5\text{ V}$ (逻辑1),高电平为 $0\text{ V}$ (逻辑0),左边的p型碳纳米管场效应管的构建见图1,右边的p型碳纳米管场效应管的构建见图9(b)。当输入电压为(1,1)态,即 $V_{in1}$ 为 $-5\text{ V}$ (逻辑1), $V_{in2}$ 为 $-5\text{ V}$ (逻辑1)时,则两个碳纳米管场效应管都开启,输出电压为 $0\text{ V}$ (逻辑0);当输入电压为(0,1)态,即 $V_{in1}$ 为 $0\text{ V}$ (逻辑0), $V_{in2}$ 为 $-5\text{ V}$ (逻辑1)时,则左边的碳纳米管场效应管截止,右边的碳纳米管场效应管开启,输出电压为

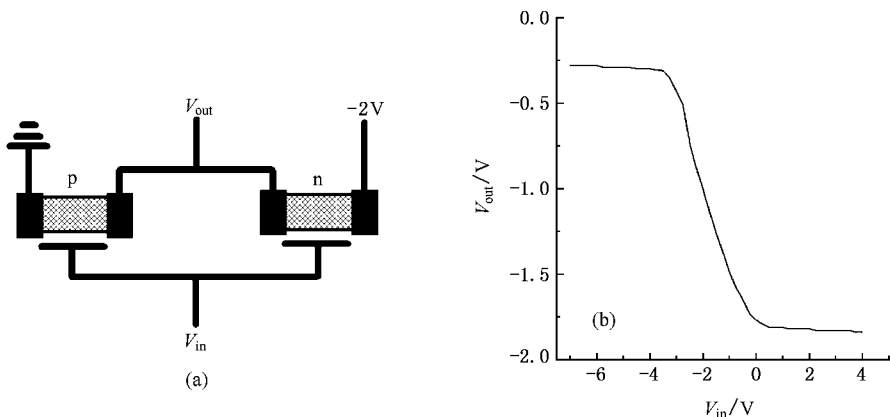


图8 互补碳纳米管场效应管反相器的(a)电路示意图(b)电压传输特性曲线

0 V (逻辑 0); 当输入电压为 (1 0) 态, 即  $V_{in1}$  为 -5 V (逻辑 1),  $V_{in2}$  为 0 V (逻辑 0) 时, 则左边的碳纳米管场效应管开启, 右边的碳纳米管场效应管截止, 输出电压为 0 V (逻辑 0); 当输入电压为 (0 0) 态, 即  $V_{in1}$

为 0 V (逻辑 0),  $V_{in2}$  为 0 V (逻辑 0) 时, 则两个碳纳米管场效应管都截止, 输出电压为 -5 V (逻辑 1). 图 9(c) 是碳纳米管或非门的输出随四种输入态 (1,1)(0,1)(1,0)(0,0) 的变化关系.

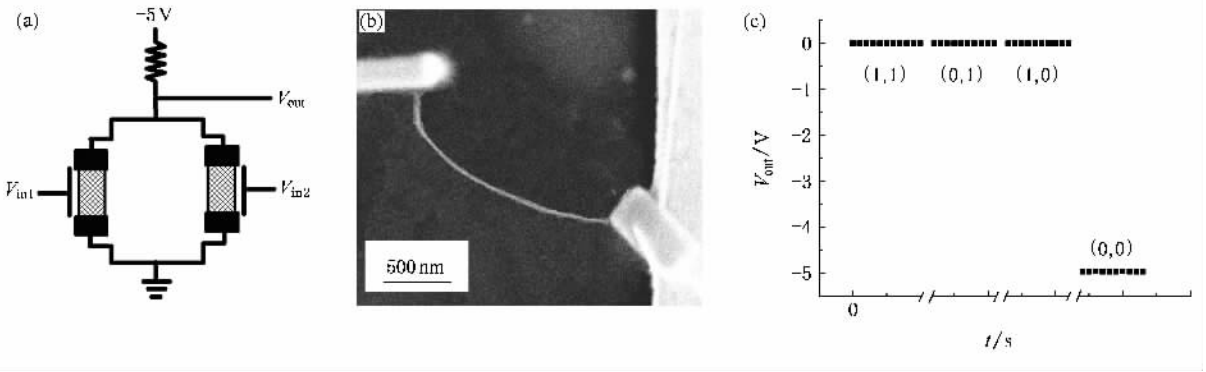


图 9 碳纳米管场效应管或非门的 (a) 电路示意图 (b) 扫描电子显微镜图 (c) 输出电压随四种输入态 (1,1)(0,1)(1,0)(0,0) 的变化关系. 每个输入态测量的时间为 20 s

## 4. 结 论

分别采用单壁碳纳米管和掺氮的多壁碳纳米管作为沟道, 获得了 p 型输运性质和 n 型输运性质的碳纳米管场效应管. 碳纳米管场效应管的输运机理被解释为门电压对金属电极与碳纳米管接触界面的

肖特基势垒的调制. 在此基础上, 我们得到了由碳纳米管场效应管构成的三种简单的逻辑电路, 分别为单个 p 型碳纳米管场效应管的开关电路、由集成在同一片硅片上的单个 p 型碳纳米管场效应管和单个 n 型掺氮碳纳米管场效应管构成的互补型反相器, 以及两个独立的 p 型碳纳米管场效应管构成的或非门.

- [1] Iijima S 1991 *Nature* **354** 7
- [2] Avouris P 2002 *Acc. Chem. Res.* **35** 1026
- [3] Dekker C 1999 *Phys. Today* **52** 22
- [4] Dai H J, Kong J, Zhou C, Franklin N, Tomblor T, Cassell A, Fan S, Chapline M 1999 *J. Phys. Chem. B* **103** 11246
- [5] Li P J, Zhang W J, Zhang Q F, Wu J L 2006 *Acta Phys. Sin.* (in Chinese) **55** 5460 [李萍剑、张文静、张琦锋、吴锦雷 2006 物理学报 **55** 5460]
- [6] Cheng J W, Yang L F 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2183 (in Chinese) [陈将伟、杨林峰 2005 物理学报 **54** 2183]
- [7] Zhang P, Li P J, Hou S M, Zhang Q F, Wu J L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3734 (in Chinese) [张萍、李萍剑、侯士敏、张琦锋、吴锦雷 2005 物理学报 **54** 3734]
- [8] Liu H, Dong J M, Wang X G 2003 *Chin. Phys.* **12** 542
- [9] Tans S, Verschueren A, Dekker C 1998 *Nature* **393** 49
- [10] Martel R, Derycke V, Lavoie C, Appenzeller J, Chan K K, Tersoff J, Avouris P 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 256805
- [11] Bachtold A, Hadley P, Nakanishi T, Dekker C 2001 *Science* **294** 1317
- [12] Heinze S, Tersoff J, Martel R, Derycke V, Appenzeller J, Avouris P 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 106801
- [13] Javey A, Guo J, Wang Q, Lundstrom M, Dai H J 2003 *Nature* **424** 654
- [14] Bockrath M, Hone J, Zettl A, McEuen P L, Rinzler A G, Smalley R E 2000 *Phys. Rev. B* **61** 10606
- [15] Chen Z, Appenzeller J, Liu Y M, Sippel-Oakley J, Rinzler A G, Tang J, Wind S J, Solomon P M, Avouris P 2006 *Science* **311** 1735

# Nanoelectronic logic circuits with carbon nanotube transistors<sup>\*</sup>

Li Ping-Jian Zhang Wen-Jing Zhang Qi-Feng Wu Jin-Lei<sup>†</sup>

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

(Received 5 June 2006; revised manuscript received 19 July 2006)

## Abstract

We demonstrate logic circuits with carbon nanotube field-effect transistors (CNTFETs). The p-type CNTFETs are fabricated based on single-walled carbon nanotubes and n-type CNTFETs are fabricated based on nitrogen-doped multiwalled carbon nanotubes. To be specific, we demonstrate three types of logic circuits with CNTFETs, which include an inverter (a p-type CNTFET), a complementary inverter (a p-type CNTFET and an n-type CNTFET in a single clip), and a logic NOR (two p-type CNTFETs).

**Keywords** : carbon nanotube, transistor, logic circuits

**PACC** : 7125X

---

<sup>\*</sup>Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2001CB610503), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 90206048, 90406014, 90406024, 60471007), and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 4042017).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : jlwu@pku.edu.cn