

纳米电子学*

薛增泉¹ 张琦锋¹ 宋教花¹ 郭等柱¹ 梁学磊^{1,2} 申志勇¹ 陈 清¹
高 崧¹ 张耿民¹ 赵兴钰¹ 刘惟敏¹ 彭练矛¹ 吴锦雷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, 北京 100080)

摘要: 在比较三代电子器件的基础上, 说明纳电子器件是电子器件发展的新一代, 它的主要特征是单电子行为和显著的量子效应. 与真空电子器件、微电子器件相比, 纳电子器件在信号加工中的主要特性有: (1) 单电子, (2) 保有相位, (3) 量子电阻 (h/e^2), (4) 量子字节 (qubit), (5) 普适电导涨落. 电子器件的基本元件是具有信号放大能力的三极管, 目前纳电子三极管有两种模式: 纳米点三极管和碳纳米管三极管. 文中重点讨论了构造纳电子三极管中的碳纳米材料的结构和特性.

关键词: 纳米电子学; 单电子; 量子字节; 碳纳米管; 巴基葱; 碳纳米管

EEACC: 2230

中图分类号: TB383

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)S0-0017-05

1 引言


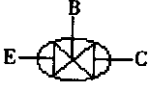
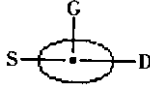
晶体管是 20 世纪伟大发明之一, 其集成电路构成的计算机和自动化机器进入科技、生产、生活、办公室和家庭等各个领域, 以其为基础的电子工业成为发达国家的主要经济支柱, 因此电子器件的发展倍受社会、政府和企业家重视. 微电子器件还在发展, 其趋势为不断地小型化. 描述这个发展趋势的为莫尔 (Moore) 定律, 即每 18 个月芯片上元件数增加 1 倍. 按此规则到 2011 年, 微电子的元件尺寸将达到其物理极限, 此后将是纳电子器件时代. 在 20 世纪末和 21 世纪初人们关注纳电子器件的发展, 国际著名杂志《Science》将纳米电子学研究的成果评为 2001 年具有突破性进展的十大科技中的第一项^[1], 指出它将对人类社会带来不可估量的影响.

从 1905 年发明第一只真空三极管, 以其为核心发展了通信和自动化的电子电路, 开创了电子器件发展的历史. 近一个世纪中电子器件有了迅速的发展, 按其三极放大管可区分为三个电子器件时代, 即

真空电子管、固体晶体管和单电子管, 相应地产生了真空电子学学科、半导体物理和纳米电子学. 每一类电子管在运行机理、所用材料和加工技术上都有本质上的不同, 因此电子器件的发展经历了两次变革. 有关它们的不同, 简单列于表 1.

表 1 三代电子器件的比较

Table 1 Comparison for three generation of electronic devices

名 称	真空管	晶体管	电子盒
放大管符号			
环境	真空	晶格	隧道隙
器件尺寸	cm	mm	mm
控制区尺寸	mm	μm	nm
自由程	m	$0.1\mu\text{m}$	$<10\text{nm}$
材料	电真空材料	单晶半导体	有机/无机?
材料纯度	高纯(5~6个9)	半导体纯(8~9个9)	?
工艺	电子管制造工艺	光刻、掺杂技术	组装, 自组织生长
理论	真空电子学(宏观)	半导体物理(宏观)	? (局域)
参量	平均值	平均值	非平均值
分布参量影响	很小	小	显著
温度敏感	很小	小	显著
载流子数量	宏观量	宏观量	有限量

* 国家自然科学基金(批准号: 60231010, 90206048)和科技部基金(No. 001CB610502)资助项目

薛增泉 男, 教授, 从事电子学工作.

名称	真空管	晶体管	电子盒
信号强度	mA	μA	nA
载流子	电子	电子/空穴	孤子,极化子, 电子,空穴
主要件控制	电流	电子/空穴数	隧穿速率
集成度	分立	$>10^{10}\text{bits}/\text{cm}^2$	$<10^{12}\text{bits}/\text{cm}^2$
加工模式	模拟	bit	qubit
加工网	分立元件	数字网	类神经网络
构造仪器	无线电、雷达	计算机	自动器、信息网

本文在表 1 所列电子放大三极管结构与特性的基础上,讨论纳电子三极管的特性与结构,特别是从碳纳米材料切入研究纳电子管.在元素周期表中,碳与硅、锗属于同一族,由于碳的 $2s, 2p$ 轨道的能量差较小,因此有多种杂化轨道,故碳存在多种同素异构体,如石墨、金刚石、富勒烯、碳纳米管等^[2].它们具有很多优异的特性,特别是与结构有关的多种多样的电学特性,可用于构建纳电子器件、电路.加之碳与有机材料和生命材料有密切的关系,在地球和宇宙中碳比硅存在更普遍更丰富,所以未来可能是碳时代.

2 纳电子器件的主要特征

纳电子器件的诞生是微电子发展小型化的必然结果.当元件的尺寸与信号电子的自由程可相比拟时,在信号加工过程中将保有相位.超高密度集成必然要求极低的功耗,导致器件在信号加工中呈现单电子行为.因此单电子行为和相干特性是纳电子器件的主要特点.以此为基础表现为 5 个主要基本特征:

(1) 单电子行为

由于纳米尺寸晶粒能级分裂(ΔE)增大,当信号载流子的能量 $E \geq \Delta E > kT$ 时,通过纳米隧穿隙可以检测到单电子传输,这个现象称为单电子行为.单电子行为最典型的表现是库仑阻塞现象,从经典理论的观点,当纳米晶粒被 1 个电子占据时,荷电能为 e^2/C ,这里 e 为电子电荷, C 为电容.若 C 很小,则荷电能足够大,大到其电位能够阻止下 1 个电子的隧穿发生,这样就产生隧穿电流的台阶行为,称为库仑阻塞现象.库仑阻塞现象必须满足条件

$$\frac{e^2}{C} \gg kT \quad (1)$$

在室温测得库仑阻塞台阶,结电容 $C < 10^{-18}\text{F}$.如果纳米晶粒电中性为状态 0,荷电为状态 1,那么开关 1 次仅需 1 个信号电子.因此功耗极低,通常的超高

密度集成也不会产生干扰器件工作状态的功率耗散和过热问题.

(2) 相位相干

当电子平均自由程与元件尺寸可相比拟时,在信号加工过程中会保有相位信息,电子波在界面、杂质、缺陷处散射或不同电子间相互作用,将发生相干现象,因此出现更多信息.材料中自由电子的 de Broglie 波长可表示为

$$\lambda = 2\pi \left(\frac{h^2}{2m^* E} \right)^{1/2} \quad (2)$$

半导体中接近导带底的电子, $E < 100\text{mV}$, $m^* < 0.1m_0$, λ 的量级为 $10 \sim 100\text{nm}$,这正是纳米功能器件的物理长度.

(3) 量子电阻

由 Landauer 导出纳米体系的电导率公式为

$$\sigma = C \times \frac{T}{1-T} \times \frac{e^2}{h} \quad (3)$$

式中 C 为与结构有关的常数; T 为电子隧穿速率; e 为电子电荷; h 为普朗克常数,可得到量子电阻为

$$R_K = \frac{h}{e^2} = 25.8\text{k}\Omega$$

(4) 量子字节 (qubit)

在微电子信息加工中的数字化,基础为 Boolean 态的 0 和 1,字节表示为 bit.当存在相位相干时,除 0、1 态外,还有多种叠加态,称为量子字节 (“qubit”).图 1 给出 qubit 的某种表示.

$$\begin{aligned} |0\rangle &= |\leftrightarrow\rangle & |\nearrow\rangle &= \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \\ |1\rangle &= |\downarrow\rangle & |\searrow\rangle &= \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

图 1 qubit 的相位为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 态的表示

Fig. 1 Notation of qubit states for phase as $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$, and 135°

(5) 普适电导涨落

在电导和电压关系测量中,发现存在与时间无关的非周期涨落,但它不是热燥声引起的,而是样品固有的.每一给定样品可以观测到其自身特有的涨落谱图.在宏观条件不变的情况下,其涨落图样可重复.因此这种涨落谱被称为普适电导涨落,它是样品的指纹.

3 电信号放大的基本元件

构成电路的最基本元件是具有电信号放大能力

的三极管,加上电阻、电容、电感可组成各种功能电路。所以强调这个非线性元件具有放大能力,是因为集成电路中,前级输出信号将作为下级电路的输入信号。有了信号放大管,原则上就可以构造各种运算电路和逻辑电路。因此研究一代电路时,从研究属于该电路放大管的结构、特性和运行机理入手是最简捷的方法。电子器件近 100 年的发展经历了三个时期:真空电子,微电子,纳电子。相应的放大管有真空三极管,是通过阴极发射,将电子引入真空,自由电子有足够长的自由程,通过栅级控制到达阳极的电子流,从而实现电信号的放大。微电子的晶体三极管,是用高纯度和完善结构的晶体,保证在固体中运输的电子有足够的自由程,通过栅(或基级)电压(或电流)控制源(或发射极)与漏(集电极)极间的电流,从而实现信号放大。

对于纳电子三极管,人们还在探索中。目前有两种模式:单电子盒和碳纳米管三极管。前者又称单电子管(single electron transistor, SET),它是由在源、漏、栅电极间纳米隙中的导体纳米晶构成的单电子管,见图 2(a)。后者是源、漏极间的碳纳米管(CNT),通过 CNT 的电子(或空穴)输运受栅电压控制,其结构见图 2(b)^[3],在基底为 Si 片的 SiO₂ 层上镀 Pt 电极,放置 CNT,构成三极管。

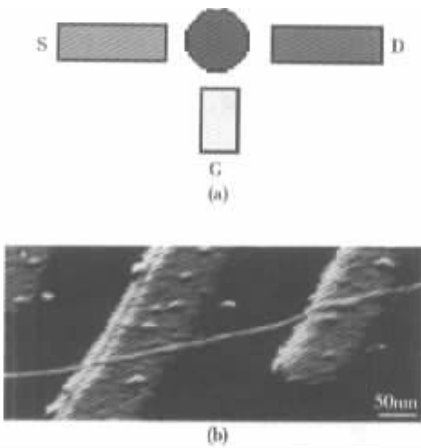


图 2 纳电子三极管的两种模式 (a)SET 结构;(b) CNT 结构

Fig. 2 Two modes of nanoelectronic triode (a) SET;(b)CNT

4 从碳切入研究纳电子器件

由于碳纳米管和碳纳米球有稳定的结构和优异

的电学特性,是非常有希望的纳电子器件材料。对于碳球,主要是碳 60(C₆₀),是 60 个碳原子都排布在表面上构成的稳定空心球,其它原子数构成的空心球也有一定的存在几率,统称为富勒烯。还存在稳定的多层同心球,称为巴基葱(Bucky onions, BOs)。BOs 很容易制备,最简单的方法是用碳纳米管真空蒸发到某个基底上,得到所需尺寸的 BOs^[4],见图 3,(a)为 AFM 像,(b)TEM 像。

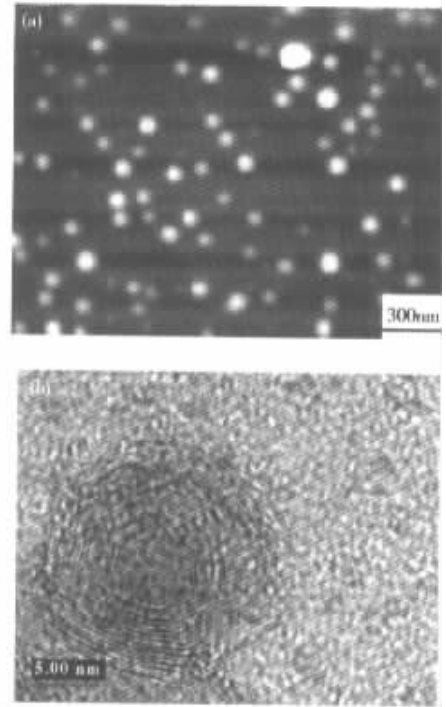


图 3 BOs (a)AFM 像;(b)TEM 像

Fig. 3 Bucky onions (a)AFM image;(b)TEM image

BOs 是导电的,我们用 STM 测量了不同尺寸的导电特性,有图 4 所示的趋势:直径小于 36nm 的呈半导体特性,大于 50nm 的有金属导电特性,详见图 4 所示的 $I-V$ 和 $dI/dV-V$ 特性。BOs 可作为 SET 中的纳米晶粒,构造纳电子三极管,容易做到结构稳定和尺寸一致。

碳纳米管(CNTs)在模型上可看作石墨片卷成的无缝圆筒,称单壁碳纳米管(SWNTs),也可形成同心多层壁的圆筒,称为多壁碳纳米管(MWNTs)。对于 SWNTs,作为一维导体,理论证明存在旋环波效应(doughnut wave effect)^[5],使弹性散射长度增加了一个系数 N_0 ,所以 SWNTs 的弹性散射自由程可表示为

$$\lambda_e = eL_e N_0 \quad (4)$$

式中 L_e 为一维纳米线的弹性散射自由程; N_0 为 SWNT 的弹性散射自由程的增加系数, 通常 $N_0 > 10$. 故用 SWNTs 构造纳电子三极管, 能保证室温下检测显著的量子特性. 由经典理论和量子理论可知, 要检测单电子和量子效应, 必须满足条件: $e^2/C > kT, \Delta E > kT$, 这里 C 是电容, ΔE 是能级宽度, T 是

绝对温度. 表明纳电子三极管的工作条件是环境敏感的、温度敏感的. 为减小分布参数的影响, 提高器件的工作温度, 最佳结构应该是纵向的. 我们将短 SWNT 组装在金属针尖前端, 通过 STM 测量碳管的 $I-V$ 特性, 得到典型结果为图 5 所示, (a) $I-V$ 曲线, (b) 纵向三极管结构, (c) 负阻特性, (d) 纵向振荡器结构, 其中 Q 为石英振子.

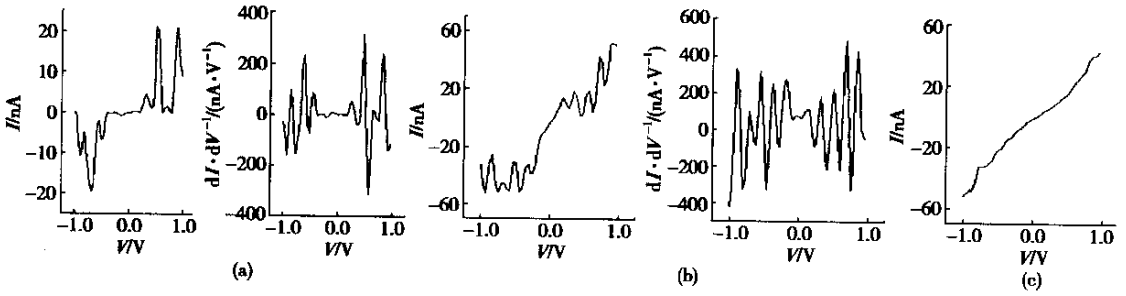


图 4 BOs 导电特性 (a)15nm;(b)36nm;(c)50nm

Fig. 4 Conducting properties of BOs (a)15nm;(b)36nm;(c)50nm

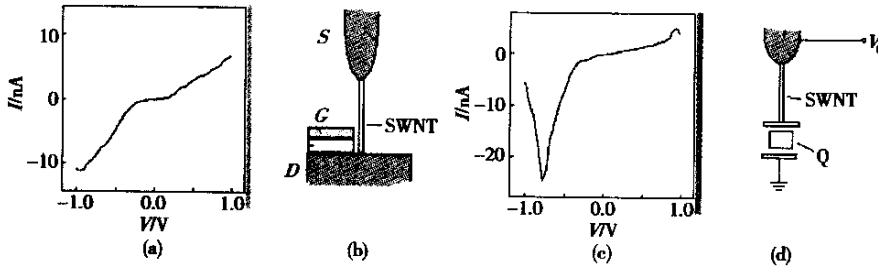


图 5 用 STM 测量纵向 SWNT 的 $I-V$ 特性 (a) $I-V$ 曲线; (b) 纵向三极管结构; (c) 负阻特性; (d) 纵向振荡器结构, 其中 Q 为石英振子

Fig. 5 Measuring $I-V$ characteristic of SWNTs with vertical mode (a) $I-V$ curve; (b) vertical transistor; (c) negative resistance property; (d) vertical oscillator, where Q is quartz oscillator

集成电路必然要形成横向排布的结构, 图 6 是先电子束光刻, 然后用原子力显微镜 (AFM) 将 CNT 推到适当电极位置, 再用聚焦离子束 (FIB) 用金属铂 (Pt) 将 CNT 固定在源 (s)、漏 (d) 电极上, SiO_2 层下面低电阻的 Si 为栅 (g) 电极, 构成碳纳米管三极管. 在 4K 下测得的 $I-V$ 曲线, 见图 7. 此结果还达不到能够放大信号的要求, 主要原因是 CNT 太长, SiO_2 层太厚, 而且 CTN 是多壁管. 需进一步改进才可能提高性能.

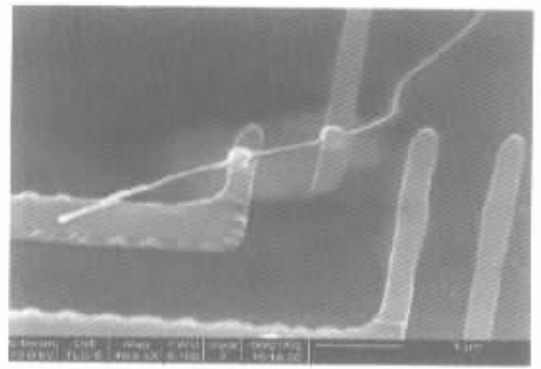


图 6 横向 CNT 的三极管结构

Fig. 6 Structure of a lateral CNT transistor

5 结论

本文在比较三代电子器件的结构、材料和运行

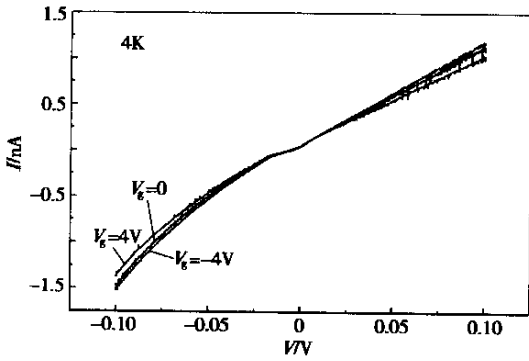


图7 横向CNT三极管的 $I-V$ 特性

Fig. 7 $I-V$ curves of a lateral CNT transistor

机理的基础上,指出纳电子器件的五个基本特征.进而提出了从碳球和碳纳米管切入,研究纳电子器件的三极管.讨论了巴基葱的结构、电学特性,三极管

的纵向结构和横向结构的初步研究结果,指出了存在问题和改进方向.

参考文献

- [1] Service R F. Assembling nanocircuits from the bottom up. *Science*, 2001, 293: 782
- [2] Colbert D T and Smalley R E. Fullerene nanotubes for molecular electronics. *Nanotechnology*, 1999, 17: 46
- [3] Dekker C. Carbon nanotubes as molecular quantum wires. *Physics Today*, 1999, 52: 22
- [4] Xue Zengquan, Liu Hongwen, Hou Shimin, et al. Investigation on the structure and electric properties of bucky onions. *Chinese Physics*, 2001, 10, Suppl: 50
- [5] Xue Zengquan, Liu Weimin, Hou Shimin, et al. Study on electronic properties of single-wall carbon nanotubes. *Mater Sci Eng C*, 2001, 16: 17

Nanoelectronics *

Xue Zengquan¹, Zhang Qifeng¹, Song Jiaohua¹, Guo Dengzhu¹, Liang Xuelei^{1,2},
Shen Zhiyong¹, Chen Qing¹, Gao Song¹, Zhang Gengmin¹, Zhao Xingyu¹,
Liu Weimin¹, Peng Lianmao¹, Wu Jinlei¹ and Wu Quande¹

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

(2 *Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: People are now endeavoring to develop nanoelectronic devices to the third generation of electron devices. Compared with their two predecessors—vacuum electronic devices and microelectronic devices, the newly emerging nanoelectronic devices have such principal distinguishing characteristics as: (1) single-electron behaviors, (2) phase retaining, (3) quantum resistance (h/e^2), (4) quantum bit (qubit) and (5) universal conductance fluctuation. The essential elements of an electronic device are triodes with the capability of signal amplification. At present two types of nanoelectronic triode amplifiers, namely nanodot triode and carbon nanotube triode, have been proposed. The structures and properties of carbon-based nano-materials which are used for the construction of future nanoelectronic triodes are discussed.

Key words: nanoelectronics; single-electron tube; quantum bit; carbon nanotube; bucky onion

EEACC: 2230

Article ID: 0253-4177(2003)S0-0017-05

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 60231010, 90206048) and Foundation of Ministry of Science and Technology of China (No. 001CB610502)

Xue Zengquan male, professor. He has worked in a field of electronics.

Received 16 September 2002, revised manuscript received 16 October 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics