

·学科进展·

纳米科学和纳米技术——挑战和机遇

王中林

(美国佐治亚理工学院纳米科学和技术中心,美国亚特兰大)

[摘要] 在科学和技术的发展史上,蒸汽机使人类进入工业时代,实现了机器代替手;晶体管和集成电路使人类进入信息时代,实现了机器代替脑。纳米技术有可能是人类历史上的第三次产业革命,它将使人类进入智能化的类生物体系的生产时代,这意味着纳米科技的最高宗旨是制造出类似于动物具有感官,智能,反馈,自修复等高级功能机器的一门技术。本文从未来科技发展对人类提出的挑战和机遇出发,阐述了发展纳米科技是迎接这些挑战的必经之路。发展纳米技术是势在必行,机不可失。从科学角度本文也论述了什么是纳米科技,为什么发展纳米科技目前如此之火热。

[关键词] 纳米科学,纳米技术,产业革命,纳米带,纳米秤

在人类文明历史发展进程中,没有任何事物可以和科学技术对人类产生的巨大影响来比拟。从蒸汽机到晶体管,两次产业革命对人类的进步起到了巨大的推动作用。纳米技术有可能是第三次产业革命。美国政府把纳米技术认定为本世纪平行于生命科学,信息技术和环境科学的四大研究领域之一;先进材料和先进制造业是这四大领域的支柱。发展纳米技术的政治气候和科学环境在近几年发生了巨大的升华,形成了全球性的研究浪潮。造成这种浩大声势的根本原因是目前技术发展的必然结果和长远需求。

1 科学技术对人类未来的挑战

计算机的发展速度是惊人的。人脑每秒的计算速度是两亿亿次。到2005年,IBM的兰基因超快计算机的速度将是人脑的二十分之一。到2023年,只花费1000美元就可以买到和人脑速度一样的计算机。预计到2049年,只花费1000美元就可以买到和整个人类计算容量相当的计算机。人类面临的是一知识爆炸和发展速度无限大的时代,宽带技术,DNA序列,基因工程等将会大大激发经济的发展。

下一百年的发展将等效于人类在目前发展速度下1.5万年所造就的辉煌。对于像我这样40岁的

人,当我65岁退休时,这世界在未来25年的发展等于目前发展速度在67年内所创造的财富。

这样的发展无疑是对人类未来生存的重大挑战和威胁。当机器的计算速度超过人脑的时候,并且在给机器具有“眼、耳、鼻、舌、身”的五官系统后,它会不会完全代替了人?未来是人控制机器还是机器控制人?从科学的角度讲,机器控制人是有可能的。我们目前已经制造出可以完成精巧设计的智能动作,可以做简单判断和反应的机器人。从人的本身来讲,人身体组成的主要元素是氢、氧、碳、氮、钙和一些盐类再加一些微量元素如铁,镁等。构成人脑95%的基本成分是水。从这些基本的元素出发,原子级的巧妙构造就可以造出“无所不能”的人来,他会听说读写、感知外界、改造世界。那么未来的机器是否也可以达到如此神通的地步?我看是有可能的,纳米科技的宗旨就是从原子和分子级设计来实现高级智能和功能化的机器。

未来的发展是人类、机器和自然的互相协调和制约。人类和机器不是谁代替谁的问题,而是有机结合,合为一体的问题。人类再发展,终将逃避不了自然规律的制约。尽管从如上数学分析得知,计算速度有可能达到一个极点,但自然规律将制约速度的无限发展。当材料的尺寸从微米级减小到纳米尺

本文于2001年8月8日收到。

度,控制物质运动的规律发生质的变化,这个变化导致了纳米科技的诞生。那么纳米科技所预言的未来世界是否可以实现呢?我们从 Arthur C. Clarke 提出的技术发展的三大定律来作一回答:

(1)“When a scientist states that something is possible, he/she is always certainly right. When he/she states that something is impossible, he/she is very probably wrong.”(当科学家认为什么事情是可能的话,他往往是对的。当科学家认为什么事情是不可能的话,他往往是错的)。

(2)“The only way of discovering the limits of the possible is to venture a little way past them into the impossible”(唯一发现有可能的极限是探索极限以外不可能的东西)。

(3)“Any sufficiently advanced technology is indistinguishable from magic”(任何先进的技术进步都是和魔术分不开的)。

定律一明确的告诫我们科学家认为的东西一般都是正确的。科学家认为纳米技术可能是人类历史上的第三次产业革命,这个预言在几十年后有可能得到证实。定律二教导我们去探索一些目前认为不可能的东西,这样才能发现技术的最高极限在何处。定律三教导我们在研究中广开思路,勇于探索,不要放弃任何偶尔的发现,从偶尔中找必然。我认为凡是做过研究的人对定律三都有切身的体会。从定律一可以预料,计算速度在数学上将达到一个极点,但这个极点在现实中是不会到来的,因为自然规律会控制人类一切的发展。纳米技术就是自然规律对人类科学技术未来发展的具体向导。

2 何为纳米技术

纳米是一长度概念。1 m 的千分之一是 1 mm, 1 mm 的千分之一是 1 μm , 1 μm 的千分之一是 1 nm, 即 1 nm 是 1 m 的十亿分之一。我们普通人的一根头发丝的直径约为 50 μm , 那么 1 nm 相当于头发丝直径的五万分之一。1 nm 相当于 5 个原子并排排列起来的长度。那么原子有多大? 打个比方, 把 1 个原子放大一亿倍, 它的大小就如 1 个乒乓球, 把 1 个乒乓球放大 1 亿倍, 它的大小就如月球。可见原子之小, 必须用特别的显微技术才能直接观察到。

纳米技术是以纳米材料为基础的。纳米材料被定义为颗粒或尺寸至少在一维尺度上小于 100 nm 且必须具有截然不同于块状材料的电学、磁学、光学、热学、化学或力学性能的一类材料体系。可见纳

米材料是以维数尺寸所定义的材料, 它包含所有的材料种类, 例如金属、陶瓷、半导体等。纳米技术是组建和利用纳米材料来实现特有功能和智能作用的高科技先进技术。这是一种从原子着手由小而大的材料合成和控制途径。纳米材料是一门在原子级设计和组建新型材料的学科。纳米材料在晶粒尺寸、表面与体内原子数比和晶粒形状等方面与一般材料有很大的不同。这些材料的奇异性能是由其本身原子尺度上的结构、特殊的界面和表面结构所决定的。举例来讲, 由于表面原子的效应, 金属铂纳米颗粒的熔点可以由大块固体的摄氏 1 772 $^{\circ}\text{C}$ 降低到 700 $^{\circ}\text{C}$ 。由尺寸效应而导致的电子能级量子化, 半导体纳米颗粒 CdSe 的光致发光的颜色可以由红色连续变化为蓝色。由于特殊的石墨层结构, 碳纳米管在室温下可以具有量子导电效应, 即电子的非弹性散射自由程如此之长以至于它在碳管内的传输过程中无热损耗, 这和普通的导线截然不同。

纳米材料研究是贯穿于整个材料学科领域的一门综合性研究。对于未来的技术, 谁掌握了先进的材料谁就掌握了科学和技术的未来。

3 纳米技术——人类历史上的第三次产业革命

为什么目前人们对纳米材料如此感兴趣? 因为在纳米尺度范围, 材料的性能发生了由量变到质变的飞跃。我们以微电子技术的发展为例来说明这个问题。微电子的趋势是运算速度越来越快, 记忆容量越来越大。到目前每一块硅芯片上可以刻制出 1 亿个逻辑单元。在如此高密度电路板上, 单元与单元之间的接线的宽度就不能超过 100—200 nm。电子在如此细的导线中的传输过程就不能用经典力学的传输方程来描述, 而必需被量子力学所取代。器件的工作原理和相互作用都会发生质的变化。因此, 一个电子的传输就足以起元件, 即单电子器件。线与线之间的电子隧道共振和量子干涉会引入新的物理现象和效应, 使人们进入量子器件时代。

目前是什么导致了人们对纳米技术如此狂热的追求? 从科技发展的历史中, 蒸汽机、铁路、电力、电话电报、石油、汽车、飞机、计算机和互联网络等重大里程碑技术的开创性发展, 使得人类文明的发展速度与日俱增, 日新月异。在人类文明历史发展进程中, 没有任何事物可以和科学技术对人类产生的巨大影响来比拟。从蒸汽机到晶体管, 两次产业革命对人类的进步起到了巨大的推动作用。蒸汽机使人

类进入工业时代,晶体管使人类进入信息时代。纳米技术有可能是人类历史上的第三次产业革命,它将使人类进入智能化的类生物体系的生产时代,这意味着纳米科技的最高宗旨是制造出类似于动物具有感官,智能,反馈,自修复等高级功能机器的一门技术。该领域如此之吸引,人们岂能丢失这么重要的机会!然而,纳米技术从本质上并不类同于一般民用技术,它是属于高科技前沿技术。为什么在目前提出了纳米技术而不是10年以前也不是10年以后?我个人认为有以下5方面的原因。

(1)微电子技术的发展已达到了纳米级的尺寸。目前电子器件尺寸已到了100 nm的范围,经典力学的极限已经来临,量子器件的发展势在必行。可以说微电子和信息技术驱动了纳米技术的发展。

(2)先进显微技术和微观操纵技术的发展使得人们可以把原子级的微观过程展现出来。近10年来透射电子显微镜,扫描通道显微镜和原子力显微镜等的急速发展给人们带来了探索微观世界的“眼睛”和操纵原子的“工具”,利用这些眼睛我们可以观测以前看不见的纳米世界,操纵以前只可以想象而不能设计建造的原子分子结构。

(3)新的纳米结构的发现,例如 C_{60} 分子,碳纳米管,半导体量子点和线,半导体氧化物带结构等,为人们展示了纳米世界的丰富多彩,奇异多变。奇异使科学变的如此神秘,多变使得技术不断有创新。利用高温固体气相法,我们成功地合成了氧化锌、氧化锡、氧化铜、氧化镉和氧化镓等宽带半导体体系的带状结构。这些带状结构纯度高、产量大、结构完美、表面干净,并且内部无缺陷、无位错,是一理想的单晶线型薄片结构。“纳米带”的横截面是一个窄矩形结构,带宽为30—300 nm,厚5—10 nm,而长度可达几毫米。和碳纳米管以及硅和复合半导体线状结构相比,“纳米带”是迄今唯一被发现具有结构可控且无缺陷的宽带半导体准一维带状结构,而且具有比碳纳米管更独特和优越的结构和物理性能。

(4)新的量子现象的发现为人们设计未来世界提供了新的色彩。新的器件,完全不一样的工作原理,给未来发展提供了新的机会。由于表面原子的比率增加,铂颗粒的熔点也随着降低。在温度低于摄氏350℃时,铂颗粒的形状无明显变化,但当温度高至610℃度时,颗粒之间团聚结合的现形明显出现,表明了表面融化的开始,而这个温度远远低于摄氏1772度固体铂的熔点。导致这种现象的原因是由于表面原子数目的相对增加。

碳纳米管的独特结构大大改变了它体内电子的态密度和模式,因而使得电子的有效传输自由程大大加大,甚至超过了它的管长。由于在低电压下碳纳米管最外石墨层的有效导电,在室温下我们观察到了量子导电响应,即导电性是一定量子数 $[1/12.9 \text{ k}\Omega]$ 且和管长无关系,更重要的是电子飞过碳纳米管时无热损耗^[1]。这和经典物理中的电阻产生焦耳热是完全不同的。

(5)超快计算机的发展可以用模拟来展现在超短时间和超小空间范围内的动态过程,为人们设计新的材料和器件提供了美好的蓝图。由于实验科学的难度相当之大,很多微观的过程是不易观察到的。人们借用计算机,利用被实验检验过的理论做基础,来展现一些复杂的物理过程。随着计算速度和容量的不断增大,理论模拟可以进一步接近实际情况。因为理论模型的复杂和参数的不确定性,不管理论计算多么完美,只有被实验检验过的理论结果才能算成立。

10年前,技术的发展没有达到这一步,数字地球的概念尚未出现,信息高速公路刚刚起步,还形不成如此大的全球科技浪潮。如果现在不进行纳米技术的基础研究,10年后科学的发展有可能满足不了技术的需求。因此,目前发展纳米技术是势在必行。

4 纳米技术对科学发展的机遇

纳米科学的发展也为人类提供了一些独特的探索机遇。材料合成要达到结构、形状和表面状态可控。只有达到结构可控才能实现性能可控。性能的功能化和智能化是纳米材料的基本特点。由于尺寸的减小,纳米材料的表征和操纵需求开辟新的方法,器件的制造也需要新的方法。从表征来讲,纳米材料的性能极大地取决于它们的尺寸和形状。测量大面积或大量的纳米材料所得的性能是整个样品的平均值,因此,单个纳米颗粒或单根纳米管的不寻常的特性就被掩盖了。例如:碳纳米管的“弹道式”量子导电效应只能在电弧放电法所制备的无缺陷的单根碳纳米管中观测到。而在用催化方法生长的碳纳米管中,由于存在大量缺陷,就不能观测到这种现象。因此,测量由原子结构所决定的单一纳米结构的性能是纳米科学的一个基本方向。对现有的测试技术和试验方法来说,表征单一纳米颗粒/纳米管/纳米纤维(统称为纳米结构)的性能是一难题。首先,因为它的尺寸(直径和长度)相当小,现有的实验手段不适用,象纤维类材料的弹性和蠕变实验,要求样品

的尺寸足够大,能够固定在试样台的夹具上,这种简单易行的方法对于纳米结构的纤维则不适用。其次,纳米结构的小尺寸使得手工操作相当困难,需要有一种针对单一纳米结构设计的专门测试技术来进行操作。因此,为了准确测量单一纳米结构的性能,开发新的方法和手段是十分必要的。

我们近来发展了一个用原位透射电子显微镜来测量单根碳纳米管力学强度的新技术^[2]。我们专门制作了可通过外加电场来控制试样的夹具。每个单根的碳纳米管能够在电镜中清楚的观察到,因而能够对单根纳米管进行性能测量。同时它的微观结构可以由透射电子图象和衍射谱图来确定。如果在纳米碳管上外加一交变电压,调制电压的频率机械共振就可以产生,而且共振的频率可精确测到。由共振频率可以唯一的决定纳米管的弯曲模量,开辟了纳米力学的新测试方法。

由此方法,我们发明了“纳米秤”^[3]。与一弹簧振子相似,如弹簧系数是已知的,通过测量振动频率,可以测出黏结在顶端颗粒的质量。在碳纳米管的端部,加上微小质量后,共振频率降低40%左右。通过简单的计算,颗粒的质量被定为是 22 ± 6 费克(1 费克 = 10^{-15} g),这是最新发现的纳米秤,也是世界上最敏感的和最小的衡器。我们预见,这个纳米秤将可以用来测量大生物分子的质量和生物医学颗粒,例如病毒,可能导致一个纳米质谱仪的产生。

基础研究已经证明许多纳米材料可以做成单电

子量子器件。和已经发展成熟的硅集成技术相比,这只是万里长征的第一步。未来的根本是能否制造出成千上万个量子器件而且可以把它们集成起来。我认为未来的发展是把纳米材料和纳米器件同硅集成技术相结合相渗透,来达到大大提高了的性能。

纳米技术对人类文明提出挑战但也给予了机遇。纳米技术要求我们从纳米尺度去设计和创造世界。这么高的要求迫使我们开发新的材料,探索新的器件,创造史无前例的科学。生命科学、信息科学和环境科学是未来发展的主要领域,而纳米科学和技术是这三大领域发展的技术支柱。发展纳米科技应该是我们的长远国策,未来高科技之命脉。发展纳米技术是势在必行,时不等人。我们应该抓住这个时机,制定切实可行的方针政策,为国家未来高科技的深入发展奠定科学基础。

致谢 感谢国家自然科学基金委员会和中国科学院的支持。

参 考 文 献

- [1] Frank S, Poncharal P, Wang Z L et al. Carbon nanotube quantum resistors. *Science*, 1998, **280**: 1 744.
- [2] Gao Ruiping, Wang Z L, Bai Z G et al. Nanomechanics of Aligned Carbon Nanotube Arrays. *Phys. Rev. Letts.*, 2000, **85**: 622.
- [3] Poncharal P, Wang Z L, Ugarte D et al. Electrostatic deflections and electromechanical resonances of carbon nanotubes. *Science*, 1999, **283**: 1 516.

NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY——CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

Wang Zhong Lin

(Center for Nanoscience and Nanotechnology, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA)

Abstract In the history of science and technology, steam engine has sparked the industrial revolution and it has achieved the substitution of human hands by machines. Transistors and integrated circuits have brought in the revolution in information technology, and made it possible to substitute human brains by computers. Nanotechnology is likely to be the third industrial revolution in human history, and it will guide men into the industrialized artificial intelligence time. The ultimate goal of nanotechnology is to manufacture systems that function like a biological system, exhibiting sensing, intelligence processing, actuating, feedback, self-diagnosing, self-recovering and self-repairing. This article is about the challenges and opportunities to be brought in by future technology, and it shows that nanotechnology is the only choice to meet the challenges. It is intended to answer the questions such as what is nanotechnology and why it is the top research agenda worldwide now.

Key words nanoscience, nanotechnology, industrial revolution, nanobelts, nanobalance