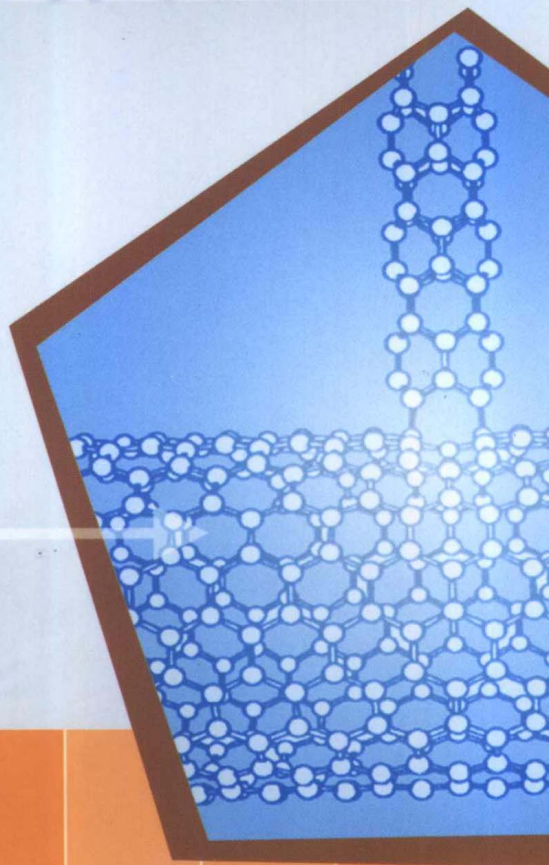


纳米科技探索

薛增泉 著



33-49

清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



(京)新登字 158 号

内 容 简 介

微电子器件小型化的趋势推动了科技发展进入纳米科技时代,本书从物理、电子学、材料科学角度阐明了这个新的科学时代。书中介绍了在这个领域中目前研究的主要内容:纳电子学、原子操纵、新型电子材料、超高密度信息存储、纳米材料完美定律、纳米材料制造、新器件的探索等等。本书还从基本科学原理出发讨论了纳米科技问题,叙述中尽量少用模型和数学公式。本书适于高中以上文化程度、关心纳米科技发展的读者。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

书 名: 纳米科技探索

作 者: 薛增泉 著

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

责任编辑: 陈国新

版式设计: 肖 米

印 刷 者: 清华大学印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 850×1168 1/32 印张: 5.5 插页: 3 字数: 138 千字

版 次: 2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-05588-2/G·279

印 数: 0001~5000

定 价: 12.00 元

前言

纳米科技探索

我们从 1989 年开始纳米科技,特别是纳米电子学的研究,从超高密度信息存储、原子操纵、纳米加工,到纳米电子器件的研究。由于我国在纳米科技领域的工作成绩,中国真空学会 1996 年在北京主办了第四届国际纳米科技学术会议,从那时开始纳米科技在中国被重视。1997 年 9 月 27 日,北京大学成立了纳米科技中心,包括五个主要研究室:纳米电子学、纳米化学、纳米生物学、介观物理和微米-纳米电子机械系统。中心成立的目的是发挥北京大学多学科的优势,促进在纳米科技研究中的学科交叉与综合,加速科学研究和人才的培养。师昌绪院士欣然接受聘请担任北京大学纳米科学与技术中心的学术委员会主任,4 年来他关注北京大学纳米科技研究工作的进展。吴全德院士任中心主任,为北京大学纳米科技中心的工作进行了卓有成效的组织领导。我本人作为学术委员会副主任,兼任纳米电子学研究室主任,从两位前辈身上学到了很多,从做学问到做人,受益匪浅。1998 年我们承担了国家自然科学基金重大项目“纳米电子学基础研究”,吴全德院士为首席科学家,领导组织了全国 10 个单位参加 8 个子课题的研究。大家同心协力,在“自下而上”的研究路径上,取得了一些具有国际先进水平的成果。一些媒体评价为“我国纳米电子学研究的起步不晚,取得的成绩不小”。说到此事,必然要提到国家自然科学基金委信息部的几位同志。电子学科的张志健和张兆田同志,为组织参加单位和立项报告费尽心力。当时的信息部领导刘志勇等同志多次参加了专家研讨会,甚至国家自然科学基金委副主任周炳昆

院士也参与研讨,指点该怎样立项。正是他们同我国学者的先见卓识和努力,才使得我国的纳米电子学基础研究启动于国际“纳米热”出现之前,使得我们在国际竞争中处于主动地位。本书能出版,首先应感谢国家自然科学基金委的资助。

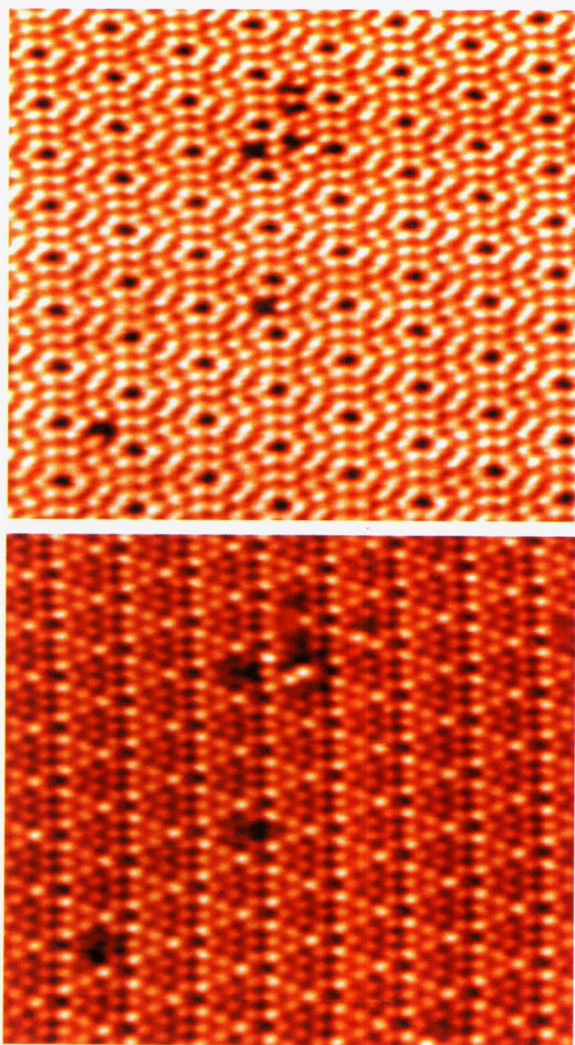
2000年初,世界出现了“纳米热”,在我国由于媒体和企业家的参与,出现了全国上下都关心纳米科技,希望了解纳米科技的热潮。在这种“纳米热”的背景下,我多次被邀请在一些大学、研究所、机关、企业、全国的一些会议,以及北京电视台、中央电视台,做有关纳米科技的演讲和讨论。将这些演讲内容编纂起来,就是本书的主要内容。

一些朋友阅读了此书的初稿,觉得第四章纳电子学难懂,读起来乏味,建议去掉。考虑到纳电子学是纳米科技中最重要的部分,它将对人类影响最大的学科,而至今我们对它还知道得很少,我觉得应该将这很少的一点概念性的知识摆在读者面前。读不懂没有关系,可以翻到后面去读,能知道纳电子学是当前电子学家研究的重要领域就可以了。

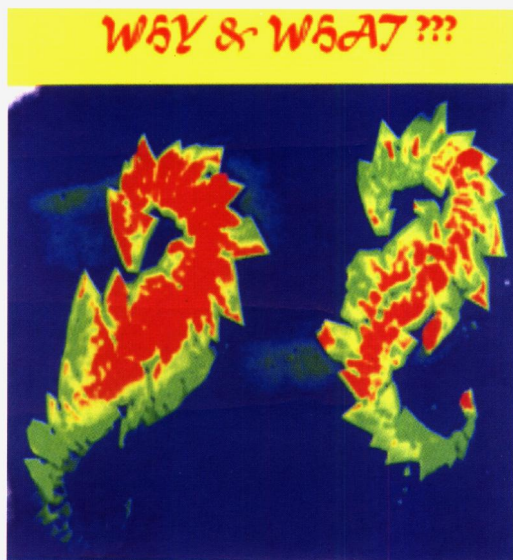
应该说目前对纳米科技的研究还只是开了个头。纳米科技是一个科学新领域,对其很多内容我们还不知道,因此错误认识是难免的。能向读者汇报我们现在的看法,与大家交流,引起诸位的兴趣就达到了此书出版的目的。

作 者

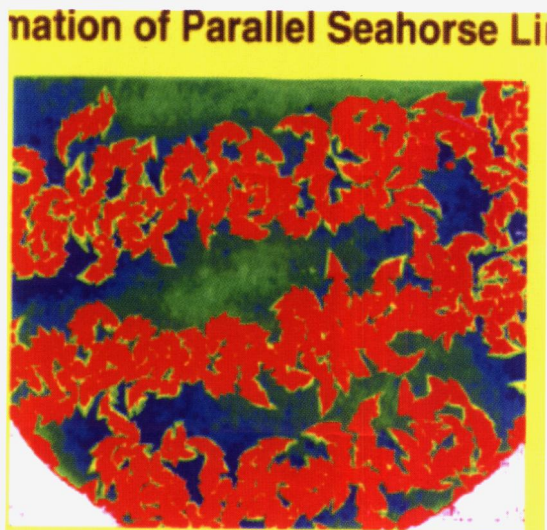
2001年10月1日



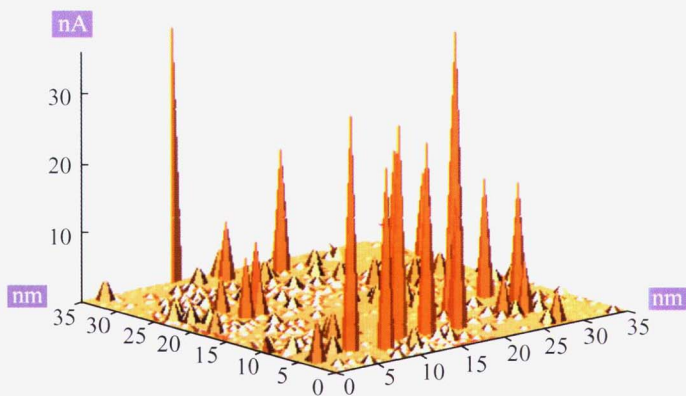
彩图1 正负偏压下Si(111)7×7表面原子像



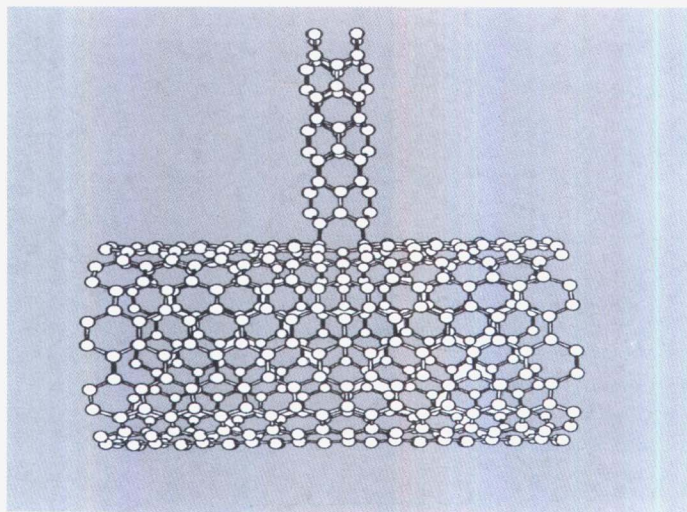
彩图 4 这是什么？为什么是这样？



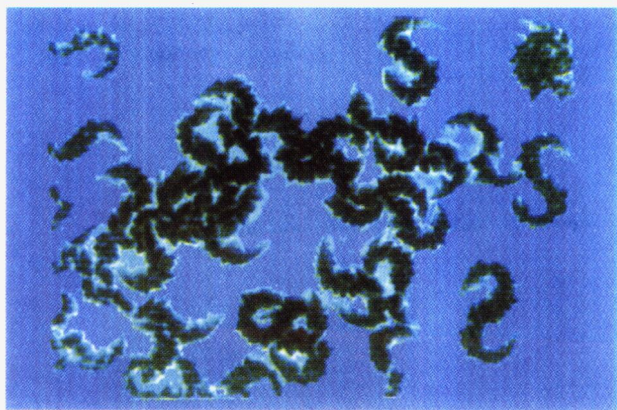
彩图 5 “海马”动物园



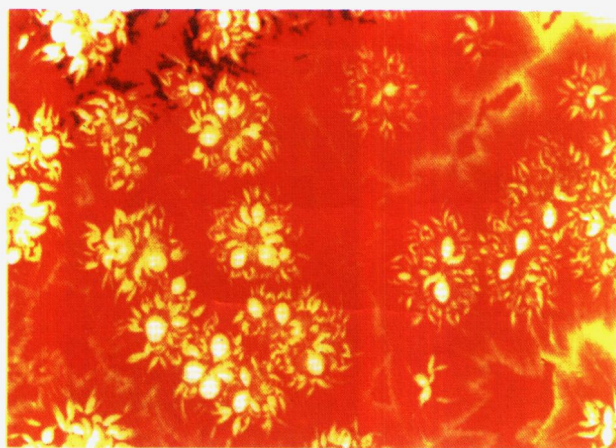
彩图2 短单壁碳纳米管竖立在金表面的 STM 电流像



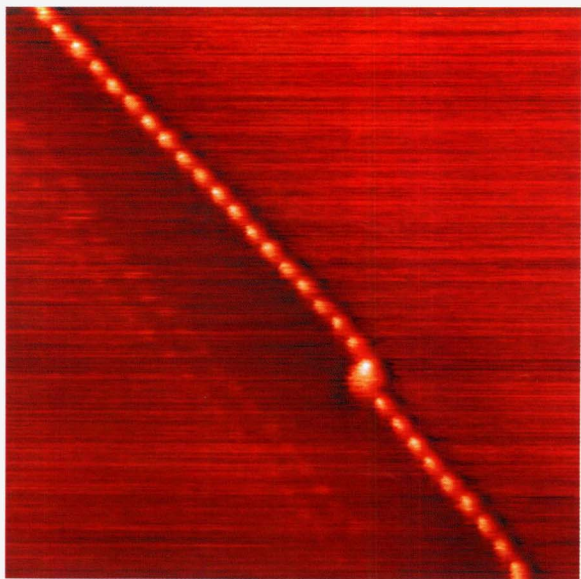
彩图3 最小的(4,0)碳管垂直生长在(11,11)碳管上



彩图6 用荷电粒子作用模型计算得到的海马图形



彩图7 如花朵一样的有机材料自组织生长



彩图8 美丽的金纳米粒子项链

目 录

纳米科技探索

一、纳米世界——一个远离我们感观的小尺寸世界	1
二、纳米科技——科学发展的新领域	15
三、科学发展的新时代	26
四、纳电子学	29
五、搬动原子写中国	51
六、迎接碳时代	62
七、探索超高密度信息存储	77
八、“海马”分形	89
九、纳米材料结构的完美定律	94
十、功能纳米材料制造	102
十一、结构纳米材料	109
十二、关于 Beeser(匕射)	116
十三、金属纳米线阵列平板显示器	123
十四、我们离纳米科技有多远	127
十五、人们对纳米科技的关注和忧虑	140
十六、让人烦恼的纳电子器件	146
十七、纳米科技与经济	151
十八、纳米科技将给我们带来什么	154
十九、社会需要真纳米	160
二十、中国的机遇与挑战	165

一、 纳 米 世 界



——一个远离我们感观的小尺寸世界

人类认识外部世界是从感观开始,用肉眼看到周围物体,借助各种望远镜探测宇宙,借助各种显微镜观察微小世界。人类早已认识到物质是由原子构成的。如果研究对象是由无穷多个原子组成的,即物体再增加或减少一小部分原子,都不会影响物体的性质,这类物体我们称为宏观物体或块体。这类物体和它们相关的物性,我们称为宏观世界。组成宏观物体的原子、分子和更小的基本粒子构成了微观世界。随着科技发展人们发现,介于宏观世界和微观世界之间还存在一个介观世界。前些年物理学家将描述这个尺寸范围的科学称为介观物理。现在人们将这个范围的结构和特性,称为纳米世界,它通常的尺寸范围为 $1\sim 100\text{ nm}$ (纳米)。纳米世界中的物体是由有限个原子构成的,它有不同于块体的结构和特性,也有不同于原子的结构和特性。人们研究纳米物体的结构和特性,为此发展了纳米科技。因此,当现在我们谈论纳米时,它也是一代新科技的代名词。

纳米有多小?

描述人类直接接触环境的参量是宏观大小的,其最小单位是毫米、克、秒。人眼睛能看到的是可见光(光波长范围为 $320\sim 760\text{ nm}$),耳朵能听到的是声波(振动频率范围为 $20\sim 20000\text{ Hz}$),可感触的是环境温度(范围为 $-100\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$)。在这个范围内,人

类是可以感受的,通过视听触摸可能分辨。我们称这个范围的参量为人类感知参量。在人类感知参量中,长度单位是米(m),其千分之一是毫米(mm),毫米的千分之一是微米(μm),微米的千分之一是纳米(nm)。由此可知 1 nm 等于十亿分之一米(可表示为 $1\text{ nm}=10^{-9}\text{ m}$)。纳米对于人类来说是一个很小的长度,如果将 1 m 与 1 nm 相比,就相当于地球与一个玻璃弹球大小相比。通常认为头发是很细微的,有时说某人吝啬,形容为“拔一毛立天下,而不为之者”,可见头发是微不足道的。而人的一根头发直径约为 $80\text{ }\mu\text{m}$,即 80000 nm,如果一个汉字写入尺寸为 10 nm,那么在一根头发丝的直径上就可写入 8000 字,相当于一篇较长的科技论文容量,这个技术对于现代是惊人的。对于这样小尺寸的信息记录和加工,还有很多科学与技术问题,这就是纳米科技领域中所要研究的课题之一。后面还会讲到有关研究进展。这个例子表明纳米科技的世界虽小,却有大量和丰富的科学与技术问题,很多事情超出了我们现今的认识和想象。

有限个原子,比如小于 100 万(10^6)个原子构成的纳米粒子,粒子尺寸约 30 nm,可见一个小纳米粒子也仍然含有很多个原子。通常称这个纳米粒子为原子团。原子团在原子结构、电子结构和力学特性上都将不同于相同原子、分子块体材料,具有很多奇异特性。这里所说的原子结构是指构成材料原子间的键长、键角和晶格结构;电子结构是指能带结构、量子态和逸出功等。在电子学、材料科学中,原子结构和电子结构的概念是经常被使用的。纳米粒子有很大的表面体积比,即位于粒子表面的原子数比例很大。比如 1 cm^3 的金(Au)含有 10^{22} 个金原子,处于表面的金原子数约有 10^{15} 个,相当于 1000 万个原子中只有 1 个原子是在表面上。若有个金原子团含有 1000 个原子,则大约有 600 个原子处于表面位置,这个原子团中原子的表面体积比为 60%。原子数越少的原子团,表面体积比越大。这种现象称为大的表面体积比,也称为具有

大的比表面。在表面的原子存在没有抓住相邻原子的化学键,称为悬挂键。悬挂键容易抓住外来原子,形成一种稳定结构,因此,悬挂键多的材料极具活性。原子团中原子的排列与相同元素块体不同,处于表面的原子倾向向外扩张,因此原子团中相邻原子间距增大。块体金的原子间距为 0.29 nm,而原子团金原子间距要大些。大多少与原子团中的原子数有关,原子团是否稳定也与原子数有关。比如通常 13 个原子构成的原子团是稳定的,而取走 1 个原子,剩 12 个原子,则 12 个原子的原子团将很快破碎,这个现象称为原子团爆炸。有的科学家在试验将一个稳定的原子团置于癌细胞中,用光或电脉冲打掉 1 个原子,让原子团爆炸,像炸碉堡那样从内部炸掉肿瘤。科学家将那些最稳定原子团中的原子数称为原子团的魔数。通常含有 13,55,147,⋯ 个原子的原子团是最稳定的。这种行为表明了纳米材料的奇特性质和复杂性。纳米科技就是研究这些不同于块体的,也不同于原子的奇特性质,以便能为人类所利用。将原子团压成块体,或加入别的材料中构成复合材料,将呈现出新的材料特性,可得到零温度系数材料(即不随温度的变化发生热胀冷缩),硬而不脆的陶瓷,以及具有多种活性的材料,等等。

通常将纳米材料分为两大类:功能材料和结构材料。功能材料主要是纳米尺寸的原子团、纳米线、纳米带等,多用于制造催化、杀菌、清洁、隐身、燃料等材料和信息器件。结构材料是由纳米粒子、纳米线、纳米带等压成的块体,或加入其他材料中构成的复合体。利用纳米粒子的活性表面和界面的奇异特性,构成新型的人造材料。功能原子团材料,因为其体积小,在常温常压下,由于布朗运动,它是悬浮在空间或液体中的。图 1 示意说明了纳米材料的结构特性和飘浮的弥散行为。因此,在使用这类材料时,特别要注意这个飘浮特性,不要造成对于人类环境和身体的污染、侵害。特别是由于纳米材料很小,小到可以容易地通过各种渠道,如呼吸

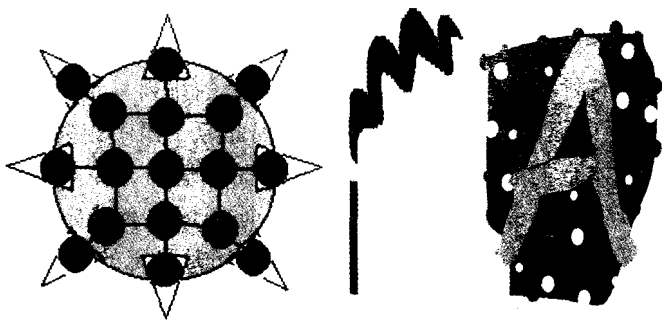


图 1 纳米功能材料：奇异结构，飘浮，无孔不入

系统、五官、甚至皮肤的毛囊孔进入人体内部，所以它是比空气中的粉尘危害更大的污染。因此，纳米科技是一把双刃剑，研究纳米科技一定要有严谨的科学精神，千万不可制造危害人类和自然的魔鬼。纳米结构材料，有的加工成本很高，其产品进入市场时，必须考虑其成本的因素。比如纳米玻璃，增加了强度，失去了脆性；目前的成本远高于黄金的价格，示意于图 2。某些原子团、纳米线和纳米带或复合材料，可能是最容易形成新型产品的主要材料，这也是目前研究最多的纳米材料，有些已在批量生产和销售。

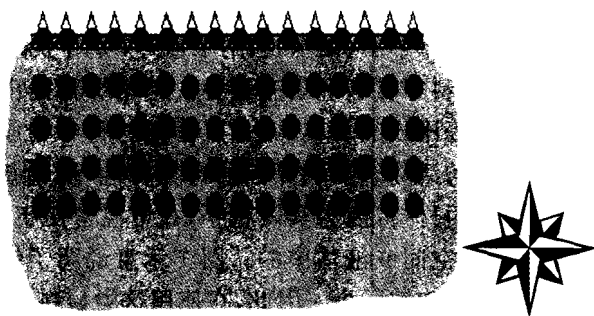


图 2 添加纳米粒子的复合材料：表面活性，高贵身价

纳米科技就是研究纳米材料的特殊结构和奇异特性,利用这些特性为人类服务,当然也要了解它对人类和自然有害的一面,加以避之。

纳米科技将会给人类带来很多惊奇。这里举一个例子加以说明。如果考虑将我国 13 亿人的名字登录下来,每个名字平均 3 个字,将近 40 亿个汉字,按现行普通书的容量,若每本 40 万字,将是 1 万本书。而用纳米记录技术,在三毛的三根头发上就足够写下 13 亿人的名字,示意于图 3。所以纳米世界对于人类是充满惊奇的世界。

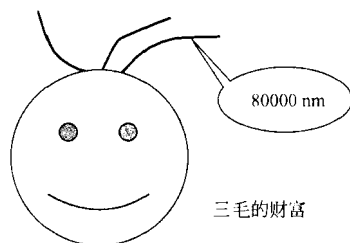


图 3 三根头发足够写下 13 亿人的名字
(相当于现在 40 万字的书 1 万本)

当我们今天谈论纳米科技的时候,必须意识到纳米科技具有更多的人造品格,即许多材料和性能是自然界不存在的,一些功能材料和器件是人造的。人造的东西中,很多是仿自然的,但又超出了自然。在 19 世纪末和 20 世纪初,人类学鸟飞,但始终没有学成真正像鸟那样飞。可是人类造出了飞机,甚至火箭,见图 4,不仅能过海跨洋环球飞行,而且还能飞出地球,登陆月球,探测火星,……远远超出了鸟的飞行能力。

有意思的是,今天在某种程度上,人类开始教鸟学习飞行。美国有一种候鸟,叫作红鹤(whooping),还有 411 只,其中只有 1 只还在按季节迁徙,其他 410 只依赖人类喂养,忘记了迁徙的本能。



图4 人类学鸟飞

美国野生动物保护协会为了训练红鹤恢复本能,造了一架专门的直升机,跟着那只还能迁徙的鸟,引导其他红鹤进行迁徙飞行训练。

社会学家说我们现在面临信息时代,可以说信息社会或智能工具就是从纳米电子器件的研制开始的。纳米电子器件将更有力地改造自然,也更深刻地改造人类自己,这将是人类社会的巨大进步。按着三次浪潮作者托夫勒的观点:在1万年以前开始了农业革命,人类开始使用工具;200年前发生工业革命,人类使用具有动力的工具,那么,在即将到来的信息革命时代,人类将使用具有智能的工具,见图5。纳米科技将是人类制造智能工具的基础,因此它是信息时代的高科技。1997年计算机“深蓝”战胜了国际象棋大师卡斯帕罗夫。在图6的照片中,卡斯帕罗夫双手抱头沮丧,观众惊愕了。这是人类的失败,还是胜利?卡斯帕罗夫本人对此次失败不服,要求再战,IBM公司说“深蓝”另有重任要执行。2001年新浪网报道,定于10月12日至11月1日将举行新一轮的人机大战。这次是由新一代的国际象棋大师克拉姆尼克与“深蓝”的下一代“深思”对阵。克拉姆尼克战胜卡斯帕罗夫后获得国

1 万年前	农业革命	制造和使用工具
200 年前	工业革命	使用具有动力的工具
不久的将来	信息革命	使用具有智能的工具



图 5 人类社会的三次革命



国际象棋超级大师卡斯帕罗夫输给了“深蓝”。人类的失败？胜利？

图 6 “深蓝”战胜了超级国际象棋大师的时刻

际象棋大师称号,成为新的棋王。计算机每秒能思考 2 亿步,而人的大脑每秒只能想 3 步。在这点上人的失败几乎是注定的,但人脑复杂的综合智能,还不是目前计算机能比的。这次对弈在 8 天内将进行 8 局,每隔 6 小时休赛一次,让人补充体力,以便与不知疲倦的计算机抗衡。总之,随着计算机的发展,人类的优势越来越少。

英国科学家 1997 年克隆了“多利”,引起了世界科学家、政治