

纳米科学技术——面向 21 世纪的新科技

李 民 乾

(中国科学院上海原子核研究所, 上海 201800)

90 年代初, 一门全新的科学技术即纳米科学技术在世界范围内出现。纳米科学技术是以许多现代先进科学技术为基础的多学科技术, 它包括纳米材料学、纳生物学、纳电子学和纳机械学等。在此, 纳米不仅意味着其空间尺度, 而且提供了一种新的思考方式, 也就是利用越来越小的精细技术生产出所需要的产品。纳米科学技术最终目标是直接操纵单个原子和分子制造具有特定功能的产品。纳米科学技术将成为下个世纪最重要的高技术。

The last decade of the century has seen the birth of the brand new field of nano scale science and technology (Nano ST) which includes nanobiology, nanoelectronics, nanomechanics, nanomaterials, etc.. The term nanometer, referring to the scale of physical size, has led to a completely new way of thinking on how to make products tailored to our requirements with ever finer precision. The ultimate goal of Nano ST is to manufacture products that possess unique functions directly from atoms or molecules. This will dramatically change our modes of production and living conditions. Nano ST will become one of the most important high technologies of the next century.

著名物理学家理查德·费因曼在 1959 年曾说过: “如果有一天可以按人的意志安排一个个原子, 将会产生怎么样的奇迹?” 今天这个美好的梦想已有可能成为现实。一门崭新的、面向 21 世纪的科学技术——纳米科学技术已经诞生了, 这对生产力的发展将产生深远的影响, 并有可能从根本上解决人类面临的一系列问题, 例如粮食、健康、能源和环境保护等重大问题。

一、什么是纳米科学技术 (Nano ST)

纳米科学技术是在 0.1—100nm 尺度上研究和应用原子、分子现象, 并由此发展起来的多学科的, 基础研究与应用研究紧密联系的新的科学技术。它是现代物理(介观物理、量子力学和混沌物理等)和先进工程技术(计算机、微电子和扫描隧道显微镜等技术)结合的产物。Na-

no ST 又将引发一系列新的科学技术, 例如纳电子学、纳米材料学、纳生物学和纳机械学等(见图 1)。纳米并非是个新名词, 但是在 Nano ST 中纳米是一种新的思考方式, 即生产过程要越来越精细, 以致最后在纳米尺度上直接由原子和分子制造具有特定功能的产品。

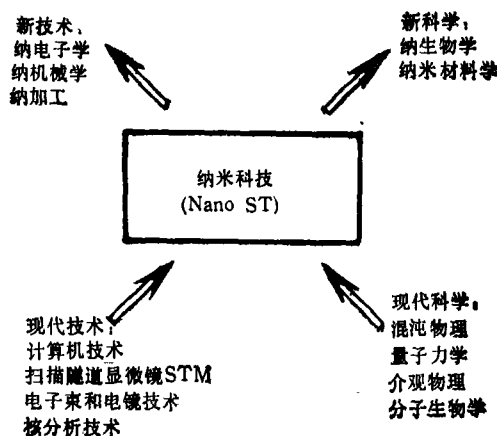


图 1 纳米科技的诞生与发展

Nano ST 直接联系于描述微观世界的量子力学原理,它将抽象的理论变为活生生的产品。最近美国 IBM 公司研制的原子尺度 (~1 nm) 的电子器件就是一个典型的例子。

二、Nano ST 的诞生和发展简史

Nano ST 的产生源头可追溯到 50 年代末,当时美国物理学家理查德·费因曼 (Richard Phillips Feynman, 诺贝尔奖金获得者) 曾提出,逐级地缩小生产装置,以致最后直接由人类按需排布原子,制造产品。这在当初只是一个美好的梦想。1977 年麻省理工学院的德雷克斯勒作了认真的思考,认为上述想法可以从模拟活细胞中生物分子的人工类似物——分子装置开始,并命名为纳米技术 (nanotechnology)。70 年代末德雷克斯勒访问斯坦福大学,成立了 NST 研究组。1982 年, G. Binnig 和 H. Rohrer 发明了扫描隧道显微镜 (STM)^[1], 以空前高的分辨率为我们揭示一个“可见的” (visual) 原子、分子世界^[2]。至 80 年代末, STM 已不仅是一个观察的手段,而且是一个可排布原子的工具。1990 年是 NST 正式诞生之年,其标志是: (1) 1990 年 7 月在美国巴尔的摩召开了第一届国际 NST 会议; (2) 两种专业国际刊物 “*Nanotechnology*” 和 “*Nanobiology*” 已经或即将出版; (3) 日本和英国等少数科技先进国家制定了发展 Nano ST 的国家规划, 美国自然科学基金会将 Nano ST 作为优先支持的项目; (4) 冠以纳米 (nano) 的新名词、新概念不断出现, 例如纳电子学 (nanoelectronics)、纳米材料学 (nanometer scale materials)、纳米显微学 (nanoscopy)、纳加工 (nanometer machining) 和纳生物学 (nanobiology) 等。

三、直观可见的原子、分子世界

STM 是 1986 年诺贝尔奖金物理学奖获奖项目。它具有空前高的空间分辨率, 横向分辨率达 0.1 nm, 纵向可优于 0.01 nm。它能直接观

察到物质表面的原子结构, 从而实现了人类长期以来希望看到原子真面目的愿望^[3,4]。由于 STM 具有原子级的空间分辨率和广泛的适用性, 使它成为 Nano ST 的主要工具, 并推动其发展。在我国, 中国科学院化学研究所、中国科学院北京电子显微镜实验室和北京大学也先后建立了 STM。中国科学院上海原子核研究所于 1989 年初研制成功国产化的数字化的 STM (SINR-I 型 STM)^[5]。STM 不仅可获得固体表面原子的 STM 图象, 而且可在自然条件下对生物大分子进行高分辨率的直接观察, 从而使它成为生命科学研究中具有极大潜力的新技术^[6,7]。应用 STM 研究 DNA 的结构更成为目前国际上普遍关注的热点, 也是中国科学院上海原子核研究所 STM 组应用研究的首选目标^[8]。1989 年元月, 美国科学杂志 (*Science*) 上刊登了第一张 DNA (B-form) 的 STM 图象^[9]。同时, 中国科学院上海原子核研究所与中国科学院上海细胞研究所合作, 应用 SINR-I 型 STM 开展了系统的 DNA 结构研究。由于采用了单分子层浓度的创新方法, 较快地取得了重大进展: 1989 年 4 月拍摄到清晰的天然鱼精子 DNA 的图象^[10]; 在同年 8 月又获得了左手螺旋的 Z-DNA 的精美的 STM 图象^[11]。其后我们与苏联科学院分子生物学所合作, 于 1989 年 12 月成功地在这个世界上首次得到了平行双链的 DNA (Parallel Stranded-DNA, 简称为 P-DNA) 的 STM 图象, 在分子结构上证实了一种新型的 DNA 构型的存在^[12]。另外, 北京大学还首次获得了 tRNA 倒 “L” 型结构的 STM 图象^[13]。1990 年初中国科学院上海原子核研究所与中国科学院上海生物化学研究所合作首次获得了 DNA 复制过程的 STM 图象。1990 年 11 月 28 日《人民日报》报道了中国科学院化学研究所首次获得了三链 DNA 的 STM 图象的激动人心的消息^[14]。虽然 STM 对生物大分子的研究在方法学上和成象机理上尚有许多工作要做, 但它在生命科学前沿研究中的重大意义是毫无疑问的。

STM 是面向 21 世纪的高技术产品, 它的

造价仅为电子显微镜的十分之一，而空间分辨率要高十倍以上，为人类打开了一个多姿多彩的原子、分子世界。图2是一个典型的例子。发表在英国出版的《自然》上用 Xe 原子排列的 IBM 商标显示了人类按需排布一个个原子的可能性^[12]。



图2 一种新的 DNA 构型——平行双链 DNA (P-DNA) 的 STM 图象(中国科学院上海原子核研究所)照片中箭头所指即为 DNA 螺旋外部的戊糖-磷酸基团脊 (backbone)

四、Nano ST 的现状与展望

现将 Nano ST 引发的几个新的主要领域(见图1)介绍如下:

1. 纳电子学 (nanoelectronics)

目前的半导体理论即 p-n 结原理至亚微米 ($0.1\mu\text{m}$) 级为止,再往下就失效了。在纳米尺度上,电子已不是粒子性而是以波动性为主了。纳电子学必须采用量子力学效应,例如隧道效应或共振隧道效应^[13],其伏安特性曲线中的峰谷比为 23:1,足以构成下一代的 nano 电子器件。它高速、低耗(可在常温下工作)、高集成度和经济可靠,会引起电子学的革命、预计至 21 世纪量子耦合器件 (IC) 将逐渐占优势。

2. 纳米材料科学 (nanometer material science)

纳米材料科学实际上包括两个部分:一个是纳米材料科学^[14],另一个是纳米尺度结构的材料研究。前者是研究尺寸处于纳米 (2—10 nm) 范围的金属、金属化合物、无机物或聚合物超细颗粒及其材料的独特性能。这些特性是既不同于整体材料也不同于原子状态的物理性能。研究纳米材料的成核 (nucleation) 和生长,其几何尺寸及成分分布,以及特性和应用,即是该学科的任务。基本观察手段是 STM 及其它相关技术。由于纳米颗粒的直径为 2—10 nm,原子数为 10^2 — 10^4 个,其中有 50% 以上为界面原子。因此必须考虑量子尺寸效应、表面效应以及可能的混沌现象。有时多一个或少一个原子就能导致纳米颗粒特性的急剧变化,所以在定量方面要应用 STM 和飞行时间谱仪以及二次离子质谱 (SIMS) 等技术进行精确测量和控制。

纳米颗粒及由这些纳米颗粒压制成的纳米固体材料,它们的潜在应用是极其广泛的。超细金属颗粒可以晶格形式沉积在硅表面上,构成高效电子元件或高密度信息贮存材料。纳米的 Ni 或 Cu-Zn 化合物颗粒对某些有机化合物的氢化 (hydrogenation) 反应是极好的催化剂,可替代昂贵的 Pt 或钯催化剂。Fe 的超细颗粒 (UFP) 外面覆盖一层厚为 5—20nm 的聚合物后可以固定大量蛋白质或酶,以控制生物反应,这在生物技术、酶工程中大有用处。聚合物的超细颗粒在润滑剂、高级涂料、人工肾脏、多种传感器及功能电极材料方面均有重要应用。

普通材料的强度、韧性及脆化等宏观特性与材料纳米尺度的结构密切相关。利用离子束分析、穆斯堡尔谱和正电子湮灭等核分析方法能十分有效地获得材料纳米尺度的结构信息,从而为材料的制备和使用创造条件,这方面的研究能为国民经济创造大量的财富^[1]。

1) J. L. Marshall et al., Grant Proposal of Nanostructure Materials Research at University of North Texas, (1989).

3. 纳生物学 (nanobiology)

人们说 21 世纪是生物学的世纪,很有道理,即便从 Nano ST 的观点看也是如此。Nano ST 的一个重要思想是学习和应用生物学原理。如果说几年前日本提出的“人类前沿科学计划”主题是研究生命物质的话,那么 nanobiology 即是在纳米尺度上应用这些生物学原理和发现新的现象了。目前能涉及的内容大体为:

(1) 在纳米尺度上了解生物大分子的精细结构及其与功能的联系,这不仅是 nanobiology 也是整个现代生物学发展的基础;

(2) 在纳米尺度上获取生命信息,特别是细胞内的各种信息。利用 STM 获得细胞膜和细胞器表面的结构信息,用亚微米扫描质子探针(SPM)测定元素成分的信息,用微传感器和纳传感器(nano-senser)获取各种生化反应的化学信息和电化学信息。

(3) 纳米机器人(nano robot)的研制:首先能想到的也正在做的是向活细胞的生物分子学习,利用 20 种氨基酸作为原料单元组成线状肽链,合成所需的蛋白质。第一代的 nanorobot 必然与蛋白质相联系是因为线状肽链能自动转变成特定的三维结构,较便于制备成具有特定功能的“生物机器”。利用肌肉细胞的纤维结构(骨架)和纤毛结构(运动部件),还可以制备具有支撑、牵引和杠杆功能的蛋白质结构,并以酶为核心统一成具有特定功能的蛋白质结构。除了这些可能还要应用一些无机结构和结晶结构,更可能要与微电子工艺(制备微型的硅齿轮等)相结合。第一代纳米机器人是生物系统(如酶等)和机械系统(如齿轮等)的有机结合体。这种技术的诱人应用是将这种多功能的微型机器人注入人体血管内,它可作全身健康检查,疏通脑血管中的血栓,清除心脏动脉脂肪沉积物,甚至还能吞噬病毒,杀死癌细胞。设想的第二代 nanorobot 应当是能直接从原子、分子装配成有一定功能的 nano 尺度的装配装置。一个可以直接借鉴的例子是细胞中的核糖体,它可按 DNA 或 RNA 传递的编码信息生产特定功能的蛋白质。因此这种 nano 装配器也应当具有自我调节能力,并转换程序。第三代 nanorobot

将是含有 nano 电子计算机的、可人机对话的并有自身复制能力的纳米装置。那时人类的劳动方式将彻底改变,劳动的主体——人将得到完全的解放。

4. 纳米工程、机械学

作为多学科的协同发展,纳米工程机械学也是不可缺少的。现仅对作为动力和定位的纳米马达以及纳米装配器的 STM 作一简单介绍^[13]。

纳米马达已有两种构造实现了 nm 级的驱动和定位,一种是基于线性马达的 Yoshida 系统,它有 1nm 的定位精度和 200mm/s 的驱动速度。另一种是基于压电陶瓷管的电致伸缩效应制成的毛虫式(Inchworm)装置,它的定位精度很容易达到 1nm。

从常规的 STM 出发,可以发展一系列改进型的 STM 装置(见图 3)。例如美国康乃尔大学 R. 布尔曼和 J. 席尔柯克斯领导的研究

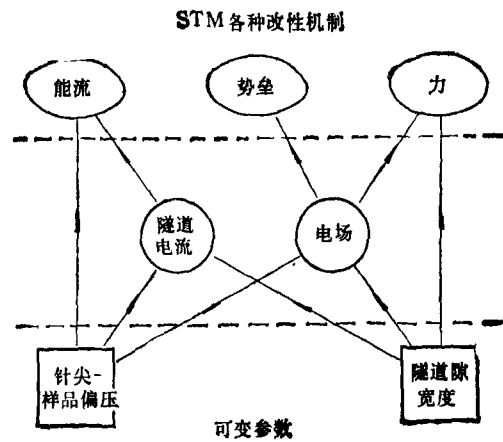


图 3 基于针尖与表面原子相互作用的 STM 改性机制^[14]

小组利用从 STM 发展而成的称为弹道电子发射电镜(BEEM),在一有金覆盖的硅片上刻写出了很小的字母,刻出的线宽仅为几个 nm。这一技术成就表明,真正的三维纳米级的制造工艺已能实现,可将信息贮存器的数据密度比现有的光盘或磁盘提高几个数量级。正如前面已经提到的,利用 STM 能拨动一个个原子,构成我们所需要的图案,因此 STM 是纳米工程

中最重要的装置之一。

另外，作为核技术的低能离子和原子束也是纳米加工的重要手段^[7]，它不仅可用来刻蚀线路，也可以用来进行表面抛光，光洁度可达 nm 级甚至原子平整。这方面的工作，国际上已经有相当的发展^[8]，国内也已经起步。

五、发展 Nano ST 的相关科学技术

Nano ST 的诞生完全是基于现代科技的发展上，以出版物数量为标准，图 4 总结了与研究 Nano ST 相关的各种科学技术，可见 60% 以上的 Nano ST 研究应用了 STM 和核分析技术。

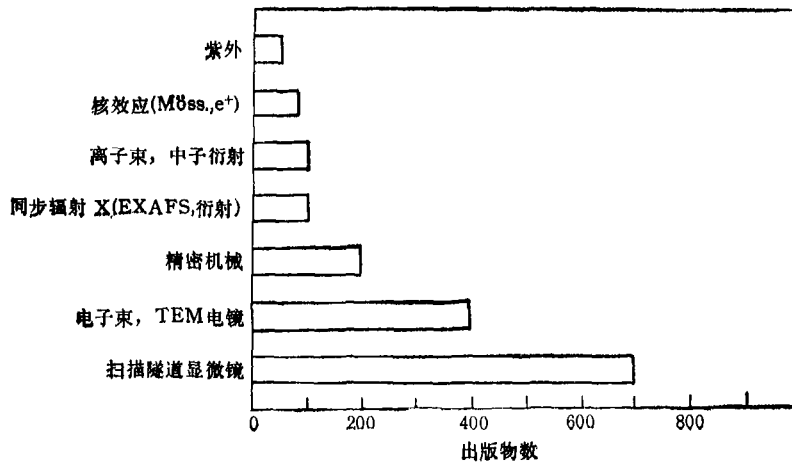


图 4 发现 Nano ST 的相关技术

在我国，1990 年 3 月在中国科学院数理化局组织下召开了纳米固体讨论会，这是在纳米材料科学上的一个有预见的反应。但就整个 Nano ST 而言，似乎尚未引起人们足够的重视，更谈不上国家规划。从面向 21 世纪，从解决我们面临的一系列严峻问题的高度出发，我们有必要及早准备和开展预研究。在人类历史上“一个充满挑战的时代也往往是一个充满机会的时代”。但机会总是降临到有准备的人的头上。

致谢：本文在写作过程中得到杨福家教授的鼓励
物理

Nano ST 的潜在重要性毋庸置疑，Nano 时代的到来似乎也只是迟早的问题。美国最早成立了 Nano 研究中心，开展了预研究。IBM 公司及德克萨斯仪器公司等都是积极参与者。日本制订了庞大的国家规模的 Nano ST 研究规划。早在 1985 年，在日本研究发展合作组织 (JRDC) 的领导下，制订了先进技术的开拓研究 (ERATO) 规划，共 14 个课题，均以学术带头人命名，至今已完成了若干课题。英国政府在财力困难情况下也支持 Nano ST 研究，现已有 350 名成员(来自 128 个公司)，暂设五个课题。到 1992 年将有 17 个项目，政府投资 12.8 百万英镑，特别在分子工程技术、生物分子工程和医学应用方面予以优先的发展。

和帮助。另外，张兰平同志在资料整理上给作者帮助颇多，在此一并致谢。

- [1] G. Binnig, and H. Rohrer, *Appl. Phys. Letter*, **40** (1982), 178.
- [2] P. K. Hansma et al., *J. Appl. Phys.*, **61**(1987), 1.
- [3] 李民乾等, *自然*, **12-9**(1989), 714.
- [4] Jr. T. P. Beebe et al., *Science*, **243**(1989), 370.
- [5] P. G. Arsolt et al., *Nature*, **339**(1989), 484.
- [6] 李民乾, *生物科学信息*, **3**(1989), 11.
- [7] Li Min-Qian et al., in *The Nuclear Structure and Function*, eds. by I. B. Zbarsky, J. R. Harris, Plenum Pub. Co, New York, (1990), 285.
- [8] Li Min-Qian et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, **B9**(1991), 1298.
- [9] Li Min-Qian et al., *Annual Report*, Shanghai Institute

新型量子器件——共振隧穿二极管和三极管的原理及应用前景

蒋 平

(复旦大学物理系, 上海 200433)

量子器件是近年来电子器件研制的一个前沿领域。本文从电子共振隧穿双势垒的基本概念出发, 介绍在此基础上发展起来的一类重要的量子器件, 即量子共振隧穿二极管和三极管的基本原理。现在已有可在室温下工作的这类器件原型, 本文以两个具体的实例说明这类新型量子器件作为功能性器件的巨大潜力。

The principles of quantum resonant tunneling diodes and transistors are discussed based on the concept of resonant tunneling of electrons through a double barrier. A prototype of such quantum devices which can operate at room temperature is reported. Potential applications of these quantum devices as functional devices are also briefly discussed.

50年代末, 江崎发明了著名的隧道二极管, 确实热闹了一阵子。但是, 不久即告偃旗息鼓, 原因是当时的技术条件未能使这一新器件得到充分发展, 性能不很理想, 很快被其他器件所取代。虽然如此, 江崎的隧道管也许不失为新一代电子器件——量子器件的开山鼻祖。近年来, 量子器件卷土重来, 有可能在未来的电子工业中取代部分常规器件而占据重要一席。

目前, 随着技术的进步, 电子器件的尺寸日益缩小, 正趋向其经典极限。电子器件的工作依赖于电子在其中的运输过程。现有的商用器件的性能大都能在半经典的框架里得到理解, 即可将电子看作是遵循牛顿力学的荷电质点。然而, 当器件尺度达亚微米级时, 量子效应就不可避免地表现出来, 使器件性能和预期的大相

径庭。这就促使电子学工程师探索新一代器件以迎接这一挑战。显然, 如果可行, “顺水推舟”, 利用量子效应设计研究新的器件应是一条顺理成章的道路。近几年, 正是在这一方向取得了相当突出的进展, 而人们也把其工作原理基于量子力学的电子波性的电子器件称为量子器件^[4]。当年江崎的隧道管的工作原理正是依据量子力学的隧道穿透效应——电子波性的一个方面。

在电子学运用中, 负微分电阻是一个很重要的特性。具有负微分电阻或负跨导的器件是电子学研究的重要领域。本文主要介绍近年见诸报道的具有这一特性的量子器件——共振隧穿(以下简称共振隧穿或 RT)二极管与双极晶体管。这一类器件的共同物理基础是双势

- of Nuclear Research, Academia Sinica, 9(1989), 40.
- [10] 刘 诚、杨威生等, 科学通报, 24(1989), 1893.
- [11] 白春礼等, 科学通报, 24(1990), 1841.
- [12] D. M. Eigler and E. K. Schweizer, *Nature*, 344(1990), 524.
- [13] M. A. Reed et al., *Appl. Phys. Lett.*, 54(1989), 1034.
- [14] 李宗全、吴希俊, 物理, 18(1989), 355.
- [15] C. R. K. Marrian et al., *Appl. Phys. Lett.*, 56(1990), 755.
- [16] M. S. Gordon et al., *Nanotechnology*, 1(1990), 67.
- [17] B. E. Fischer, *Nucl. Instr. Methods Phys. Res.*, B54(1991), 401.
- [18] J. L. Duggan et al., *Nucl. Instr. Methods Phys. Res.*, B40/41 (1989), 709.